



Rafael José Gomes Serra

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

Avaliação do estado de tensão real de paredes de alvenaria de pedra com recurso a macacos planos

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Perfil de Construção

Orientador: Professor Doutor Fernando Farinha da Silva Pinho
Professor Auxiliar, FCT/UNL

Co-orientador: Professor Doutor Válder José da Guia Lúcio
Professor Associado, FCT/UNL

Júri:

Presidente: Professor Doutor Corneliu Cismasiu, FCT/UNL

Arguente: Professor Doutor António Manuel Pinho Ramos, FCT/UNL

Vogal: Professor Doutor Fernando Farinha da Silva Pinho, FCT/UNL



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Maio de 2019

Avaliação do estado de tensão real de paredes de alvenaria de pedra com recurso a macacos planos

Copyright, Rafael José Gomes Serra, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a todos aqueles, professores, técnicos, amigos e família, que contribuíram, de alguma forma, para a conclusão desta grande etapa.

Em primeiro lugar, agradeço ao meu orientador, Professor Fernando Pinho, pela sua amizade, orientação, disponibilidade, paciência e confiança depositada em mim durante este percurso. Agradeço, não só pelas suas palavras, mas também pelas ações que tomou em alturas que pareciam não ter solução. Ao Professor Válder Lúcio, meu co-orientador, um enorme obrigado por todas as suas sugestões pertinentes e tempo despendido, assim como a sua boa disposição contagiante.

Aos técnicos de laboratório, Jorge Silvério e José Gaspar, e ao Eng. Vítor Silva, por todas as suas contribuições na campanha experimental. Com a vossa constante boa vontade e amizade, tornaram certamente muito mais fácil todo este percurso.

À Eng. Helisa Muhaj e ao Eng. Brisid Isufi, pela ajuda prestada no reforço da base do modelo experimental e na instalação do hardware no exterior do DEC.

À funcionária administrativa, Maria da Luz, pela sua enorme simpatia e humor com que sempre me recebeu e ajudou.

Ao Eng. Pedro Freire da empresa ZIRCOM, pela sua pronta disponibilidade de procurar e fornecer o material que precisava, um enorme obrigado.

À empresa OZ, em especial ao Eng. Carlos Mesquita, pela sua paciência infindável em esclarecer questões, a sua vontade genuína em ajudar e pelo fornecimento dos macacos planos. Ao Eng. João Pires pela disponibilidade em deixar-nos acompanhar uma campanha experimental.

Ao Eng. João Lourenço e colegas pela vossa disponibilidade e insistência em ajudar.

Ao Professor Maurizio Orlando pelos esclarecimentos e pelo envio de material de estudo.

Ao Sr. Hélder Paiva da empresa SOGESTURBI pelo fornecimento da documentação referente ao edifício pombalino.

À Professora Gracinda Guerreiro pela simpatia, amabilidade e completa disponibilidade demonstrada no esclarecimento de questões.

Ao André Saraiva, com quem partilhei momentos de frustração ridículos e pelos teus constantes diálogos filosóficos, no laboratório, às 22:00h.

Ao membro que recentemente saiu da Team Hernandez, aumentado assim o nível de gigantismo da equipa, um grande obrigado por uma amizade inexplicável, no melhor dos sentidos. Que estes anos de

universidade sejam apenas uma amostra do que está para vir e que nos tragam muitos cafés em Coimbra, com pequenas passagens na Figueira da Foz!!

Ao Roberto Carlos, pelas vezes que te queixas da altura em que me levaste ao otorrinolaringologista, pela quantidade anormal de sushi que já comemos juntos e pela tua amizade e ajuda durante este (nosso) percurso.

Ao Tiago Paiva, Igor, Alex, Marinheiro, Leandro, Pires, Madeira, Manel, Catarina e a todos os outros, por toda a vossa amizade e companhia ao longo destes árduos anos!

À Beatriz, pela tua companhia, carinho, apoio e amor que nunca hesitaste em demonstrar, estando sempre ao meu lado quando mais precisei.

Ao meu tio/padrinho, pelo teu gigante interesse em questões relacionadas com engenharia, por todos os diálogos aliciantes que tens comigo e com aqueles que te rodeiam, e pelos teus envelopes recheados de “patrocínios” para ir beber um café. Ao meu irmão, pela tua amizade e carinho (eu sei que tens!), e por teres sempre alguma coisa para dizer, mesmo sendo completamente inoportuno! Aos meus pais, é completamente indiscreto o quão agradecido estou por todas as oportunidades que me deram, muitas vezes à custa de muito esforço, dedicação e sacrifício, e que sempre me puseram a mim e ao meu irmão em primeiro lugar. Por todo o vosso carinho e amor (não podemos esquecer a paciência!), estou eternamente grato por terem sempre feito tudo e mais alguma coisa para que nunca nos faltasse nada. São o meu exemplo para a vida, de dedicação, trabalho, humildade e amor.

À memória da minha avó, pelo seu orgulho enorme em mim e no meu irmão.

Resumo

Na fase de inspeção e diagnóstico de estruturas de alvenaria de pedra e tijolo, muitas vezes é necessário avaliar as características mecânicas dos elementos resistentes, com vista à realização do correspondente projeto de reabilitação. No caso da alvenaria de pedra, material muito heterogêneo, o número de ensaios disponíveis para se proceder a esta caracterização *in-situ* é reduzido, consistindo essencialmente na utilização de macacos planos. O equipamento é composto por duas chapas soldadas, criando um reservatório de espessura fina, com uma entrada para injeção de óleo e uma saída para a purga de ar, podendo ser utilizado em diferentes variantes.

Nesta dissertação, apresenta-se e discute-se os resultados dos ensaios realizados em modelos experimentais de paredes de alvenaria de pedra calcária, assente com argamassa de cal hidráulica natural, com vista à determinação do estado de tensão com macacos planos simples e a sua comparação com a tensão real instalada.

Conclui-se que a aplicação desta metodologia, no elemento estrutural analisado, possui uma variação da ordem dos 13 %. São também propostas recomendações, relativas à determinação da tensão instalada.

Palavras-chave: Parede de alvenaria de pedra; macacos planos simples; estado de tensão.

Abstract

At inspection and diagnostic phases of masonry structures, it is often necessary to evaluate their mechanical characteristics. In the case of stone masonry, a very heterogenous material, the number of *in-situ* tests available to assess these characteristics, is very limited, with the flat-jack test being the most used method. The flat-jack consists of two welded plates, making up a reservoir with an inlet and outlet port, to allow the injection and removal of oil and air, through a pressurization system.

In this paper, results from the experimental campaign, carried out on a wall built with limestone masonry and natural hydraulic lime, are presented and discussed, with the aim of comparing the stress obtained from the flat-jack test with the real stress applied.

The application of this method, in the structural element analysed, resulted in an error of roughly 13 %. Various recommendations are put forward, relating to the application of this methodology in such masonry walls and regarding the validation and determination of the *in-situ* compressive stress.

Keywords: Stone masonry wall; simple flat-jack; Stress state.

Índice

1. Introdução	1
1.1. Enquadramento geral	1
1.2. Motivações e objetivo	3
1.3. Organização da dissertação	3
2. Enquadramento do tema	5
2.1. Introdução	5
2.2. Considerações iniciais	5
2.3. Soluções construtivas de paredes de alvenaria antigas	7
2.4. Técnicas de ensaio	9
2.5. Ensaio de macacos planos	10
2.6. Ensaio de macacos planos simples	11
2.6.1. Fator de calibração K_m	12
2.6.2. Fator de área K_a	14
2.6.3. Resultados de ensaios laboratoriais	17
2.6.4. Resultados de ensaios <i>in-situ</i>	20
2.7. Ensaio de macacos planos duplos	23
2.8. Teste de Tube-Jack	25
2.9. Caso de estudo do estado de tensão de um edifício pombalino	26
3. Programa Experimental	29
3.1. Introdução	29
3.2. Caracterização do modelo experimental	29
3.3. Aplicação da carga vertical no modelo	32
3.3.1. Modelação SAP2000	37
3.3.2. Procedimento e material necessário	38
3.4. Equipamento para a campanha experimental	40
3.5. Campanha de ensaios de macacos planos simples	42
3.5.1. Procedimento de ensaio	42
3.5.2. Ensaio A	47
3.5.3. Ensaio B	48
3.5.4. Ensaio C	49
3.5.5. Cumprimento da normalização	50
3.5.6. Controlo da tensão instalada	52

4. Apresentação e discussão de resultados	53
4.1. Introdução	53
4.2. Resultados da campanha experimental	53
4.2.1. Influência da área de contacto na variação estimada.....	58
4.2.2. Análise da pressão de cancelamento por interpolação e regressão linear	59
4.3. Comparação de resultados	61
4.3.1. Terceiro fator de correção.....	64
5. Conclusões e propostas de trabalhos futuros.....	65
5.1. Conclusões	65
5.2. Propostas de trabalhos futuros.....	66
Referências Bibliográficas	69
ANEXO I.....	73

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Estatística referente ao número de edifícios em Portugal.....	1
Figura 1.2 - Cronologia das tipologias construtivas em Portugal	1
Figura 1.3 - Variação do número de edifícios de 2001 para 2011, de acordo com a tipologia de construção.....	2
Figura 1.4 - Número de fogos concluídos entre 1991 e 2011.....	2
Figura 1.5 - Metodologia para comparação de valores obtidos	3
Figura 2.1 - Edifícios Monumentais	5
Figura 2.2 - Centros históricos	6
Figura 2.3 - Parede exterior de alvenaria ordinária de pedra.....	8
Figura 2.4 - Mosteiro dos Jerónimos, Lisboa	8
Figura 2.5 - Construção de alvenaria de pedra seca, Loriga.....	8
Figura 2.6 - Construções de alvenaria mista, Lisboa	9
Figura 2.7 - Tipologia de secções transversais de paredes	9
Figura 2.8 - Procedimento para o ensaio de macacos planos simples.....	11
Figura 2.9 - Comparação da pressão num macaco plano "perfeito" e real.....	12
Figura 2.10 - Esquema de calibração.....	13
Figura 2.11 - Variação do factor de calibração para diferentes pressões e materiais.....	13
Figura 2.12 - Distribuição de tensões em macacos planos	14
Figura 2.13 - Esquematização da força actuante num rasgo	15
Figura 2.14 - Áreas de contacto diferentes para um mesmo rasgo	15
Figura 2.15 - Áreas de contacto para diferentes cortes	16
Figura 2.16 - Evolução da área de contacto para cada macaco plano	17
Figura 2.17 - Modelo experimental de alvenaria ensaiado por Paulo Rossi em 1982	17
Figura 2.18 - Estudo de cargas excêntricas com recurso a macacos planos	18
Figura 2.19 - Parede de alvenaria com máquina de corte acoplada	18
Figura 2.20 - Ensaio de macacos planos simples.....	19
Figura 2.21 - Ensaio de macacos planos simples.....	20
Figura 2.22 - Esquematização e aplicação <i>in-situ</i> das chapas desenvolvidas por Miranda.....	20
Figura 2.23 - Análise do estado de tensão num edifício de 42 andares	21
Figura 2.24 - Estudo realizado no Centro Histórico de Bragança	22
Figura 2.25 - Torre Grossa, Siena, Itália	23
Figura 2.26 - Pontes analisadas por Arêde et al.....	23
Figura 2.27 – Esquematização do ensaio de macacos planos duplos	24
Figura 2.28 - Ensaio de macacos planos duplos <i>in-situ</i>	24

Figura 2.29 - Janela de ensaios para tube-jack e macacos planos.....	25
Figura 2.30 - Alçado frontal e planta do edifício pombalino em estudo	27
Figura 2.31 - Distribuição das cargas do pavimento.....	28
Figura 2.32 - Estado de tensão para o edifício em estudo	28
Figura 3.1 - Modelos experimentais de alvenaria construídas em 2012	29
Figura 3.2 - Modelo experimental de alvenaria C1	30
Figura 3.3 - Dimensões da parede de alvenaria C1.....	31
Figura 3.4 - Confinamento e posição dos varões de confinamento do modelo C1.....	32
Figura 3.5 - Esquematização da área de influência de cada varão.....	32
Figura 3.6 - Determinação do diâmetro dos varões através de um paquímetro digital	34
Figura 3.7 - Esquema e aplicação do equipamento necessário ao tensionamento dos varões	34
Figura 3.8 - Diferença entre a altura útil e altura necessária nos varões	35
Figura 3.9 - Procedimento de substituição dos varões existentes no modelo experimental	36
Figura 3.10 - Reforço efetuado na base do varão V1	36
Figura 3.11 - Dispersão de tensões na face sul do modelo experimental.....	37
Figura 3.12 - Equipamento necessário ao tensionamento dos varões	38
Figura 3.13 - Montagem do equipamento necessário ao tensionamento dos varões e para a aquisição de dados	39
Figura 3.14 - Preparação e aplicação da tensão	39
Figura 3.15 - Equipamento para o ensaio de macacos planos simples.....	41
Figura 3.16 - Esquematização do equipamento para o ensaio de macacos planos simples.....	41
Figura 3.17 - Distribuição dos ensaios	42
Figura 3.18 - Marcação da linha de corte.....	43
Figura 3.19 - Colagem das miras	43
Figura 3.20 - Realização do rasgo	44
Figura 3.21 - Verificações e colocação do macaco plano dentro do rasgo.....	45
Figura 3.22 - Montagem do equipamento	46
Figura 3.23 - Utilização do alongâmetro.....	46
Figura 3.24 - Fotografias e cotagem relativas ao ensaio A	47
Figura 3.25 - Levantamentos geométricos do ensaio A	48
Figura 3.26 - Fotografias e cotagem relativas ao ensaio B.....	49
Figura 3.27 - Fotografias e cotagem relativas ao ensaio C.....	50
Figura 3.28 - Distâncias requeridas pelas normas ASTM e RILEM	51
Figura 3.29 - Evolução da força aplicada, ao longo do tempo, em cada varão	52
Figura 4.1 - Evolução do deslocamento relativo dos alinhamentos para os ensaios de macacos planos simples.....	54
Figura 4.2 - Evolução da pressão média e respetivos valores de pressão de cancelamento	55

Figura 4.3 - Evolução de uma linha de pressão e respetivo coeficiente de determinação.....	56
Figura 4.4 - Patamares de pressão consoante o deslocamento relativo para o ensaio A.....	57
Figura 4.5 - Variação média dos três ensaios, de acordo com a área de contacto entre o macaco e a alvenaria	58
Figura 4.6 - Influência da soldadura na área de contacto do macaco.....	59
Figura 4.7 - Pressão de cancelamento para diferentes abordagens	60
Figura 4.8 - Comparação de variações obtidas, para o ensaio simples, entre vários autores	61
Figura 4.9 - Intervalo de confiança a 95 % para ensaios laboratoriais.....	62
Figura 4.10 – Médias e desvios padrões para ensaios <i>in-situ</i> e laboratoriais	62
Figura 4.11 - Dispersão de tensões num elemento de alvenaria	63

Índice de Tabelas

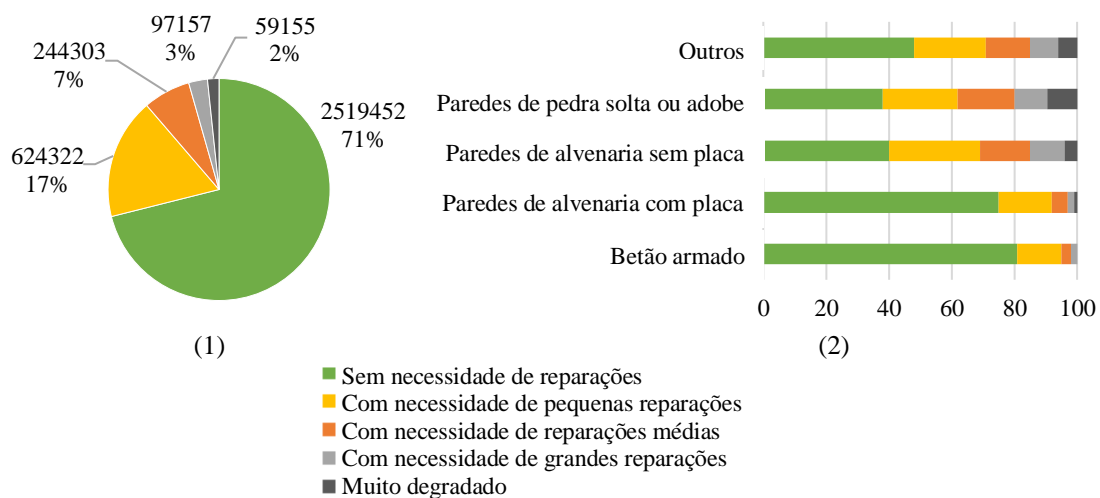
Tabela 2.1 - Classificação de danos reduzidamente destrutivos	10
Tabela 2.2 - Valores obtidos pelo ensaio de macacos planos simples	19
Tabela 2.3 - Variações de ensaios realizados em Coimbra	21
Tabela 3.1 - Área de influência e respetiva força por varão	33
Tabela 3.2 - Valores requeridos e adotados para a campanha experimental, em centímetros	51
Tabela 3.3 - Tensão atuante em cada zona de ensaio	52
Tabela 4.1 - Pressões de cancelamento médias	53
Tabela 4.2 - Pressões de cancelamento médias, sem alinhamentos defeituosos	55
Tabela 4.3 - Variações obtidas pela metodologia experimental e de cálculo	57
Tabela 4.4 - Variações de acordo com a influência da soldadura na área de contato	59
Tabela 4.5 - Variações obtidas de acordo com as linhas de regressão linear	60
Tabela 4.6 - Comparação entre a variação obtida por interpolação e regressão linear	60

Capítulo 1

Introdução

1.1. Enquadramento geral

Em Portugal, no ano de 2011, totalizam-se 3 544 389 edifícios, dos quais aproximadamente metade constituídos por estrutura de betão armado e, os restantes, de alvenaria com ou sem placa [1]. De entre todos estes, 71 % encontram-se em boas condições, sem necessidade de reparações, ao contrário dos restantes 29 % que carecem de intervenção, Figura 1.1 - (1). Esta necessidade é mais notória em edifícios com paredes de alvenaria sem placa ou de pedra solta, Figura 1.1 - (2), o que poderá estar relacionado com o seu tempo de vida, já que estas tipologias são mais correntes até ao primeiro quartel do século XX [2], Figura 1.2.



1 - número de edifícios de acordo com o estado de conservação; 2 - valores percentuais, para cada tipologia

Figura 1.1 - Estatística referente ao número de edifícios em Portugal, (adaptado de [1])

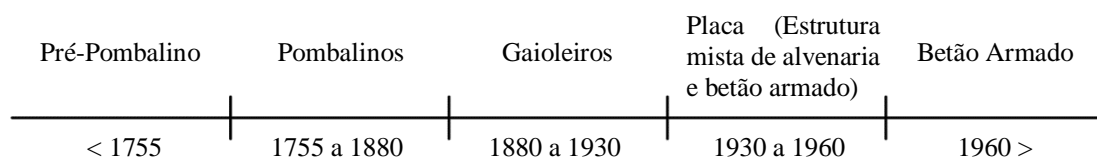


Figura 1.2 - Cronologia das tipologias construtivas em Portugal

É de salientar um decréscimo no número de edifícios com estrutura de alvenaria, sendo uma das causas a preferência pela demolição ao invés da reabilitação, Figura 1.3. É importante referir que, quase a totalidade dos edifícios com estrutura de alvenaria sem placa, pedra solta ou adobe, têm uma idade superior a 100 anos [1], na sua maioria pertencendo a um património arquitetónico que deve ser preservado, não só pelo seu valor cultural, mas também como forma de promover a descentralização, com o regresso da população a centros históricos que hoje se encontram abandonados e envelhecidos.

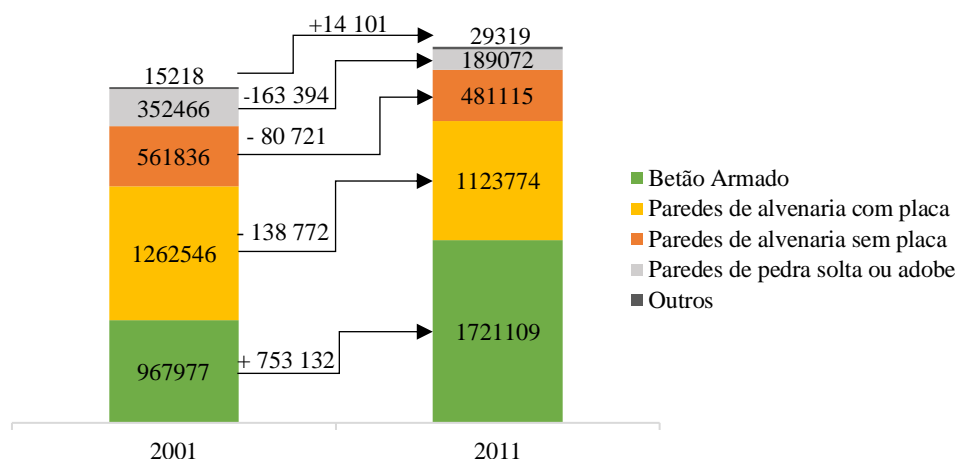


Figura 1.3 - Variação do número de edifícios de 2001 para 2011, de acordo com a tipologia de construção, (adaptado de [1])

Embora os dados apresentados neste capítulo sejam de 2011, podendo estar ultrapassados relativamente ao ano de 2019, é de notar a diminuição gradual sofrida pela construção nova, Figura 1.4, que em conjunto com a promoção da reabilitação urbana, poderá resultar, no sector da AEC, num crescimento da reabilitação, algo que poderá vir a ser confirmado aquando a realização do Censos 2021. Em 2011, a reabilitação situava-se em 26,1 % [1] do total da produtividade deste setor, estando, no entanto, aquém da média europeia que se situa nos 34,9 % [3]. Apesar da estabilização que esta tem sofrido nos últimos anos, a sua participação no número de fogos concluídos tem vindo a crescer, Figura 1.4.

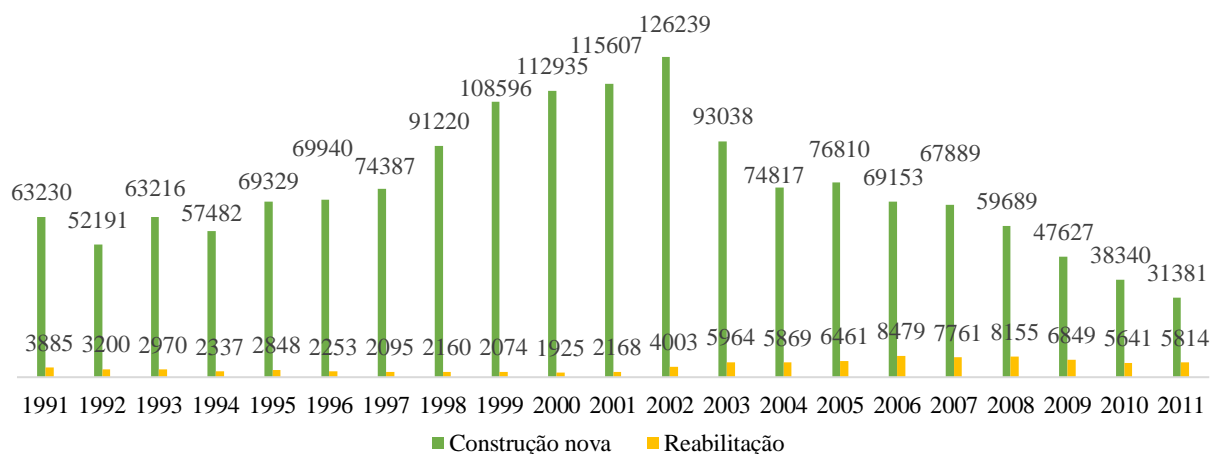


Figura 1.4 - Número de fogos concluídos entre 1991 e 2011, (adaptado de [1])

1.2. Motivações e objetivo

Com uma inclinação crescente para a reabilitação de edifícios em Portugal, surge a necessidade de reforçar ou alterar a sua estrutura, cujas propostas de intervenções sejam desenvolvidas sem comprometer a sua segurança global [2]. A variedade de ensaios *in-situ*, pouco intrusivos, que permitem retirar dados relativos à caracterização mecânica de elementos estruturais, é muito escassa, recorrendo-se frequentemente ao ensaio de macacos planos.

Esta dissertação tem como objetivo a realização de três ensaios experimentais de macacos planos simples numa parede de alvenaria de pedra calcária assente em argamassa de cal hidráulica natural. Sabendo-se a tensão real instalada no modelo experimental, σ_R , obtida por cálculo numérico e por uma modelação realizada no programa de elementos finitos SAP2000, comparar-se-ão os valores de tensão obtidos pelos ensaios, σ_E , com esta tensão σ_R , obtendo assim a variação do valor experimental para o real, Figura 1.5. Pretende-se desta forma, aprofundar a aplicação de macacos planos em elementos construtivos com uma constituição semelhante.

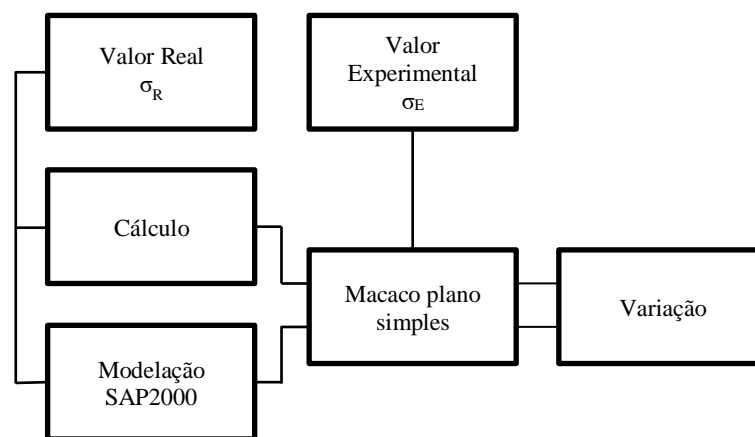


Figura 1.5 - Metodologia para comparação de valores obtidos

Neste trabalho é exposta uma componente teórica, analisando-se trabalhos de outros autores, apresentando também um enquadramento histórico e uma componente prática, onde se inserem os ensaios de macacos planos simples. Nestas secções é apresentado todo o procedimento adotado e inconvenientes encontrados, discutindo-se os resultados obtidos.

1.3. Organização da dissertação

A dissertação divide-se em cinco capítulos e um anexo, organizando-se da seguinte forma:

Capítulo 1 – Introdução em que é feito um enquadramento do tema, apresentadas as motivações, objetivos da dissertação e a organização deste trabalho.

Capítulo 2 – Enquadramento do tema onde são apresentadas considerações iniciais sobre a conservação do património edificado, tipologias de paredes de alvenaria de pedra e explicadas as vertentes do ensaio de macacos planos. Apresentam-se também resultados de trabalhos de diversos autores, relacionados com a caracterização de paredes de alvenaria com recurso a macacos planos.

Capítulo 3 – Programa experimental no qual se apresentam as preparações para a realização dos ensaios, assim como uma descrição do modelo experimental e das zonas ensaiadas. Todos os inconvenientes encontrados, instrumentação e procedimentos adotados, são aqui descritos.

Capítulo 4 – Apresentação e discussão dos resultados onde são apresentados e analisados todos os resultados obtidos relativos à realização dos três ensaios. É feita uma comparação com valores obtidos de investigações provenientes de outros autores.

Capítulo 5 – Conclusões e propostas de trabalhos futuros em que é feito um resumo geral de todo o trabalho realizado, apresentando-se as conclusões retiradas e sugeridos trabalhos de continuidade desta investigação.

Anexo I apresenta a folha de medição criada para o ensaio de macacos planos simples.

Todas as figuras que não estejam referenciadas, são da responsabilidade do autor, com exceção da Figura 2.5 – 1, da autoria do Sr. Prof. Válder J. G. Lúcio e das figuras presentes na secção 2.9, providenciadas pela empresa SOGETURBI.

Capítulo 2

Enquadramento do tema

2.1. Introdução

O presente capítulo aborda aspetos a ter em consideração nas intervenções que se façam em qualquer edificado histórico. É feito um enquadramento dos diferentes tipos de paredes e ensaios a realizar, com especial ênfase para o ensaio de macacos planos. São apresentados diversos trabalhos de investigação, no âmbito da presente dissertação.

2.2. Considerações iniciais

A autenticidade do património arquitetónico está, não só na sua aparência, mas também na integridade de todos os seus elementos, sejam eles os materiais ou a técnica de construção utilizada, resultando num produto único da sua época [4]. Este património engloba, não só edifícios monumentais, Figura 2.1, mas também os habitacionais, industriais e comerciais que, isoladamente ou em conjunto, Figura 2.2, ajudam a perceber a evolução do homem ao longo do tempo, talvez até de forma mais marcante do que o que sucede com os monumentos individualizados que, por vezes, não são mais do que expressões individuais referentes à época [5].



1 - catedral de Berlim, Alemanha; 2 - santuário do Bom Jesus, Braga

Figura 2.1 - Edifícios Monumentais



1 - centro de Estocolmo, Suécia; 2 – vila de Loriga, Guarda

Figura 2.2 - Centros históricos

“Entre nós, é vulgarmente considerado que a conservação dum edifício histórico, obedece aos mesmos conceitos de qualidade aplicados na indústria da construção em geral, sem lhe ser reconhecida qualquer especificidade resultante, quer do facto de se tratar de um objeto de valor artístico e histórico, quer ainda do seu carácter único e insubstituível. Este tipo de abordagem é claramente errado, por serem radicalmente diferentes, não só os fins a atingir, como os meios de os alcançar” [6].

É importante a fixação de terminologia própria, no que trata a conservação do património histórico edificado. Apresenta-se, de seguida, uma análise de vários conceitos fundamentais da conservação do património [6]:

- **Conservação:** Engloba todas as ações destinadas a prolongar o tempo de vida de um edificado. Esta designação, de espectro alargado, engloba um ou vários dos seguintes conceitos;
- **Manutenção:** Operações preventivas destinadas a manter uma edificação em bom funcionamento;
- **Reabilitação:** Aumento do nível de qualidade de um edificado, por forma a atingir a conformidade com exigências funcionais mais severas do que aquelas para as quais foi inicialmente concebido;
- **Reversibilidade:** Possibilidade de um dado material poder ser removido no final da sua vida útil, sem causar danos na envolvente.

As intervenções de reabilitação sobre edifícios antigos, devem basear-se em critérios que se adequem a cada situação e garantir que no novo uso dos edifícios sejam respeitadas as exigências em vigor [7]. Ao contrário da construção nova, em que basta conhecer as características do terreno onde se vai edificar, estas intervenções pressupõem um conhecimento, mais ou menos profundo, das próprias construções existentes [8].

Muitas vezes, estes edifícios são compostos por alvenaria de pedra, o que traz diversos problemas no que trata à sua caracterização como elemento resistente, já que este é um material heterogéneo e anisotrópico. As suas propriedades são altamente influenciadas pelo tipo de agregado e rocha utilizados, assim como a sua disposição e orientação. É, portanto, mais moroso e complexo o processo de intervenção neste tipo de estruturas. Caracterizar as propriedades mecânicas deste tipo de edifícios torna-se uma tarefa ainda mais difícil, já que estes têm restrições associadas ao seu património.

O estudo do método construtivo e detalhes estruturais, como a solução construtiva de uma parede, tem grande importância numa análise que estude o comportamento mecânico de um edifício. Para uma avaliação estrutural correta, é necessário ter um conhecimento aprofundado de: (i) história e evolução do edifício, (ii) geometria, (iii) detalhes estruturais, (iv) mapeamento de fissuras e material desgastado, (v) técnicas de construção e respetivos materiais, (vi) propriedades dos materiais e (vii) estabilidade estrutural [9].

2.3. Soluções construtivas de paredes de alvenaria antigas

As paredes podem ter diferentes finalidades, classificando-se em paredes resistentes ou mestras e paredes divisórias ou de compartimentação [10]:

- **Paredes resistentes ou mestras:** Apresentam uma espessura considerável, entre 0.50 m e 1.50 m, constituídas por materiais heterogéneos, originando elementos rígidos e pesados, com boa capacidade de resistência à compressão, mas não tão eficazes ao corte, flexão e tração. Este peso tem grande influência na força estabilizadora do elemento;
- **Paredes divisórias ou de compartimentação:** Estas paredes, além de uma função divisória, desempenham também funções estruturais. Apesar de não receberem diretamente cargas verticais, a sua ligação com os restantes elementos, contribui para um travamento geral das estruturas, podendo dissipar significativamente a energia de um sismo.

O tipo de pedra e argamassa a utilizar na construção, dependia do minério existente na região. No Minho e parte de Trás-os-Montes e Beiras, Alentejo, etc., é comum observar-se granitos e xistos devido à sua abundância na zona, enquanto que o calcário prevalece na região da Estremadura. Esta utilização de pedras de diversas origens e formas de ligação entre si, levou à adoção de designações variadas para as paredes de alvenaria de pedra [10]:

- **Alvenaria ordinária ou de pedra irregular:** Esta alvenaria é obtida pelo assentamento de pedra com argamassa de cal aérea e areia, cuja pedra, como o nome indica, possui uma geometria irregular, Figura 2.3.



Figura 2.3 - Parede exterior de alvenaria ordinária de pedra

- **Alvenaria aparelhada:** Constituída por pedras irregulares assentes em argamassa, seleccionam-se as pedras rijas e de melhor aspeto para os paramentos, originando assim uma superfície praticamente plana. Existia também um aperfeiçoamento das arestas, dando-lhes formas regulares, Figura 2.4.

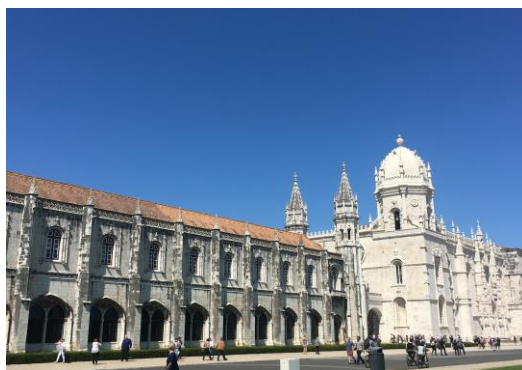


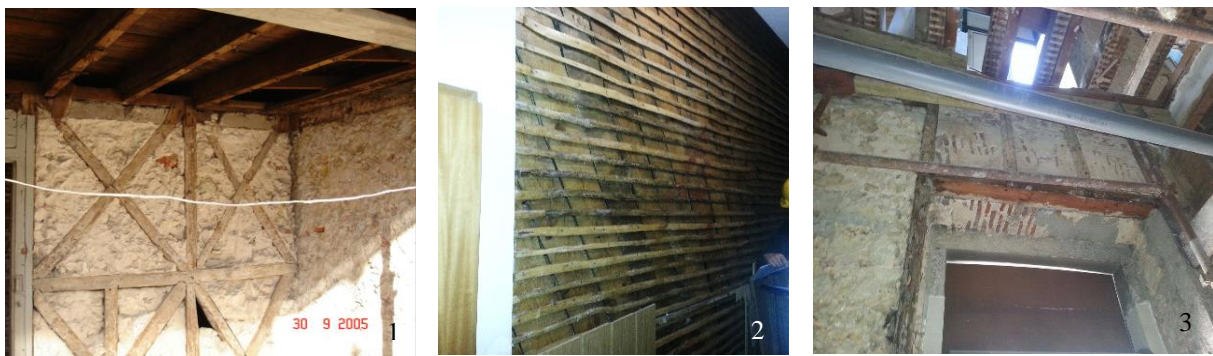
Figura 2.4 - Mosteiro dos Jerónimos, Lisboa

- **Pedra seca, insonsa ou mal argamassada:** Ao invés de um assentamento generalizado com argamassa, a consolidação da estrutura era feita maioritariamente com pedras, já que a argamassa era escassa. Os intervalos entre as pedras maiores eram preenchidos com outras mais pequenas, que seriam partidas para obter uma forma adequada ao preenchimento, Figura 2.5.



Figura 2.5 - Construção de alvenaria de pedra seca, Loriga

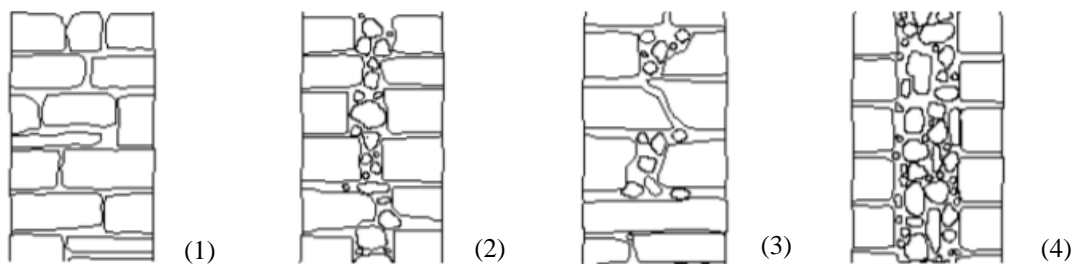
- **Mista:** Como a designação indica, esta alvenaria possui pedras de origens diferentes, assim como a junção de outros elementos, como tijolo, ferro e madeira. Uma solução de parede mista bastante conhecida, é a de parede de alvenaria e madeira, característica da reconstrução da Baixa Pombalina após o terramoto de 1755. Apesar desta solução já existir antes do período pombalino, é a partir deste ponto que existe uma grande divulgação deste método construtivo. A construção pombalina caracteriza-se pela existência de paredes resistentes espessas exteriores. As interiores, são reforçadas por uma armadura ou esqueleto de madeira, paredes de frontal, constituídas por um conjunto de peças verticais, horizontais e inclinadas, formando as “Cruzes de Santo André”, que, por sua vez, formam uma armação tridimensional de madeira, *gaiola pombalina*, Figura 2.6.



1 - parede de frontal com Cruz de Santo André; 2 - núcleo central com parede de tabique; 3 - alvenaria mista de tijolo e pedra

Figura 2.6 - Construções de alvenaria mista, Lisboa

Relativamente à secção transversal da alvenaria, esta pode ser dividida em diferentes tipos, com diversas dimensões e ligações [9]: pano simples, duplo e triplo, Figura 2.7.



(1) - parede de alvenaria de pano simples; (2) - pano duplo sem ligação; (3) - pano duplo com ligação (4) - pano triplo com enchimento

Figura 2.7 - Tipologia de secções transversais de paredes, (adaptado de [11])

2.4. Técnicas de ensaio

A caracterização e estudo de um edifício pressupõe levantamentos de geometria, materiais e respeitantes anomalias, assim como a caracterização desses mesmos materiais, com recurso a diversos tipos de

ensaios. Nesta caracterização, é usual a utilização de ensaios *in-situ* ou laboratoriais. Tratando-se de construções antigas, o recurso a ensaios *in-situ* de índole pouco intrusiva, será o mais adequado. Estes ensaios poderão dividir-se em ensaios destrutivos, medianamente destrutivos (MDT) e não destrutivos (NDT). Todavia, um ensaio não destrutivo poucas vezes o é, já que a maioria inflige danos localizados, porém facilmente reparáveis, sendo mais correcto o termo “reduzidamente destrutivo” [8]. Na Tabela 2.1 é apresentada uma classificação de danos para estes ensaios.

Tabela 2.1 - Classificação de danos reduzidamente destrutivos, (adaptado de [8])

Classificação dos danos	Descrição	Exemplos	Medidas de reparação	Construções em que é aceitável
Irrelevantes	Visíveis apenas se procurados, não visíveis às distâncias normais de observação	Marcas de martelo, riscos, manchas de água	Nenhumas. Escovagens	Todas
Ligeiros	Visíveis de perto, mas geralmente impercetíveis	Furos de pequeno diâmetro, danos de pequenos penetrómetros	Reparação com argamassa da mesma cor	Todas, exceto em edifícios classificados, em zonas perto dos utentes
Médios	Óbvios, mas sem relevância estrutural ou para a durabilidade, a curto prazo	Remoção de material de juntas, pequenas unidades de alvenaria ou carotes de pequeno diâmetro	Substituição da unidade e reparação da junta com argamassa expansiva	Todas, exceto em edifícios classificados, em zonas perto dos utentes

A obtenção de informação quantitativa, relativa a caracterizações mecânicas de materiais, apenas é possível na grande maioria dos casos, com recurso a ensaios reduzidamente destrutivos ou destrutivos. O tipo de ensaio a utilizar, dependerá da informação que se pretende obter. Um dos ensaios empregue para a caracterização de um elemento de alvenaria, é o de macacos planos.

2.5. Ensaio de macacos planos

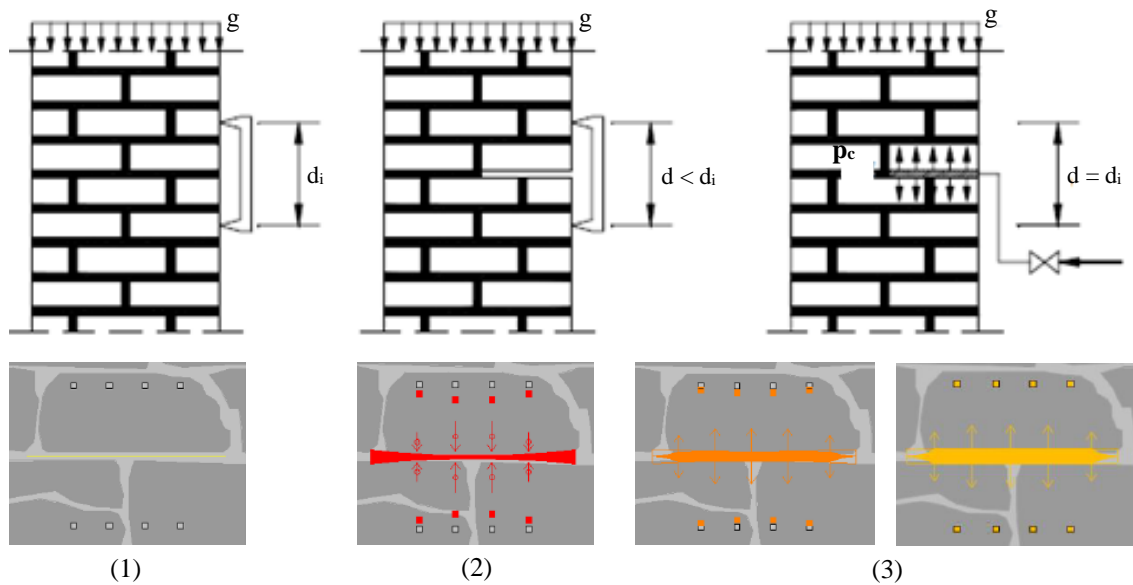
Inicialmente utilizado na determinação das propriedades mecânicas de massas rochosas, este ensaio foi adaptado para o estudo de paredes de alvenaria de tijolo por Paulo Rossi na década de 80 [12]. Podendo inserir-se num ensaio *in-situ* reduzidamente destrutivo, já que a sua realização apenas incide sobre uma pequena secção de argamassa ou alvenaria e é facilmente reparável, é extremamente relevante dado a informação quantitativa que é possível obter. Um macaco plano é composto por duas chapas finas soldadas, que formam no seu interior um reservatório que pode ser preenchido com óleo sob pressão. Este pode ter diferentes geometrias e espessuras, mas é usual a utilização de macacos planos rectangulares, ou semi-ovais.

O ensaio de macacos planos simples permite determinar o estado de tensão de compressão instalado num elemento resistente [13], [14] e o duplo estima o módulo de elasticidade e a resistência à compressão [15], [16]. Ambos são regulamentados pelas normas RILEM, International Union of

Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures, e ASTM, American Society for Testing Materials. Na presente dissertação, o tema de estudo principal será a vertente simples.

2.6. Ensaio de macacos planos simples

Com a criação de um rasgo numa alvenaria sujeita a um estado de tensão de compressão, essa tensão provoca uma aproximação dos limites superiores e inferiores da ranhura. Através da inserção de um macaco plano e o aumento gradual de pressão até que a deformação inicial seja reposta, é possível determinar a tensão instalada. Antes do rasgo, são colocados três ou quatro alinhamentos perpendiculares a este, cada um com uma mira acima e abaixo do rasgo, procedendo-se à medição da distância entre esses dois pontos, d_i , Figura 2.8 - (1). Esta medição é normalmente feita com um alongâmetro. Com o corte na alvenaria, ocorre a sua deformação devido à libertação da tensão instalada, diminuindo assim a distância inicialmente medida, d , Figura 2.8 - (2). Com a introdução do macaco plano e pela pressão que este exerce na alvenaria, a distância d é gradualmente aumentada com os incrementos de pressão aplicados no macaco, até atingir novamente a distância d_i , Figura 2.8 - (3).



- (1) - medição entre pontos de cada alinhamento, antes do rasgo; (2) - medição da distância imediatamente após o corte;
(3) - incrementos de pressão até à reposição da distância inicial

Figura 2.8 - Procedimento para o ensaio de macacos planos simples, (adaptado de [17], [18])

A pressão correspondente ao momento em que a deformação no alinhamento é reposta, denomina-se pressão de cancelamento, P_c . Uma vez que cada alinhamento irá repor o seu estado de deformação inicial em valores de pressões diferentes, a pressão de cancelamento do ensaio, P_{cm} , é dada pela média das pressões de cancelamento de cada alinhamento, expressão (2.1):

$$p_{cm} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{c,ALi} \quad (2.1)$$

Em que n representa o número de alinhamentos considerados.

Esta pressão, correlacionada com dois fatores de correção, K_a , que exprime a área de contacto do macaco plano com a alvenaria e a área do rasgo, e k_m , referente à sua calibração, permite determinar a tensão de compressão instalada no elemento de alvenaria, expressão (2.2):

$$\sigma = K_a \times K_m \times P_{cm} \quad (2.2)$$

Em que σ é a tensão instalada, K_a é o fator de área e K_m o fator de calibração.

2.6.1. Fator de calibração K_m

Um macaco plano tem determinada rigidez, resistindo à expansão quando lhe é aplicada pressão. Daí, a pressão existente dentro do macaco será superior à pressão que este exerce na alvenaria, sendo necessário a calibração do equipamento para relacionar estas pressões [13]. A Figura 2.9, exemplifica um cenário com uma recta a representar um macaco plano “ideal”, onde a pressão interna é transmitida na totalidade para o exterior. No entanto, na realidade isso não acontece devido à rigidez mencionada, com a segunda recta a representar um cenário mais provável, onde a pressão interior é superior à externa.

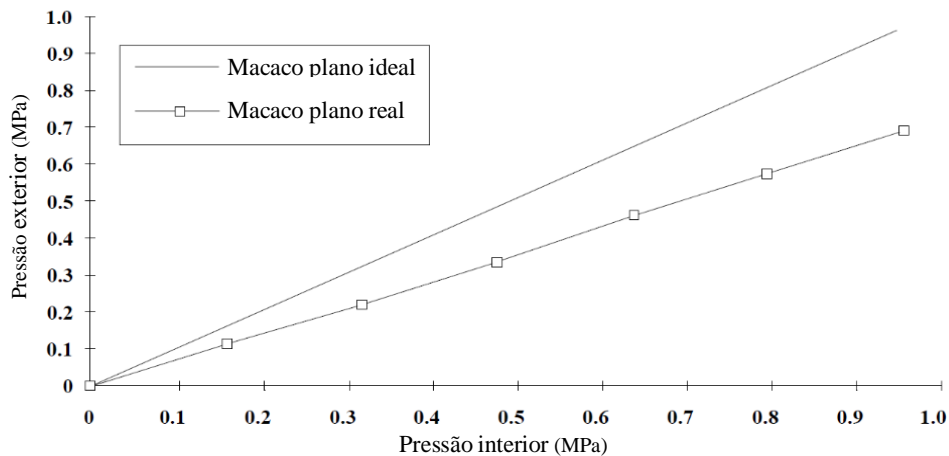


Figura 2.9 - Comparação da pressão num macaco plano "perfeito" e real, (adaptado de [17])

Este fator, é obtido com a colocação do macaco plano entre duas chapas metálicas, que cubram a totalidade da sua área, numa prensa capaz de medir uma força que lhe seja imposta, Figura 2.10 [13]. Através de incrementos de pressão introduzidos pelo macaco e com as chapas da prensa fixas, é possível registar a força que este exerce na prensa, assim como a pressão dentro do macaco. O declive da recta traçada, com os valores de pressão interior no eixo horizontal e exterior no eixo vertical, Figura 2.9, resulta num valor adimensional que representa o fator de calibração, K_m [13]. O ângulo dessa mesma

recta nunca poderá ser superior a 45° , o que implicaria valores de pressões exteriores, superiores às interiores, sendo que esse valor máximo representaria um macaco plano ideal [19].

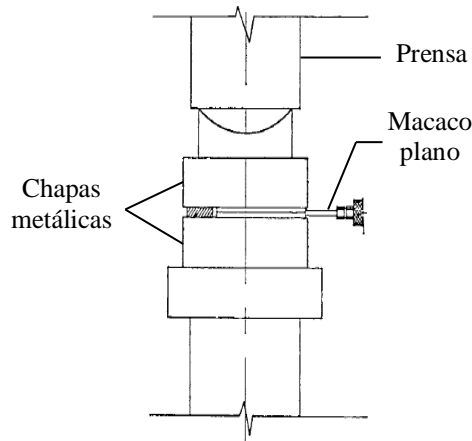


Figura 2.10 - Esquema de calibração, (adaptado de [13])

O fator é também influenciado pelo intervalo de pressão em que se está a trabalhar, assim como a rigidez do macaco. Mendola et al. [19], realizaram um estudo onde utilizaram duas amostras, B e C, cada uma composta por três macacos planos, todos eles do mesmo fabricante, em que a amostra B possui uma rigidez inferior à C. Cada amostra foi submetida a uma calibração semelhante à sugerida pela norma ASTM [13], em que se utilizaram dois intervalos de pressão diferentes, Figura 2.11. Verificou-se que, para pressões altas, com valor máximo a atingir cerca de 6 MPa, o valor de k_m é superior ao obtido em pressões baixas, valor máximo de 0.65 MPa, assim como para os macacos planos mais rígidos, amostra C, o fator é também inferior à outra amostra.

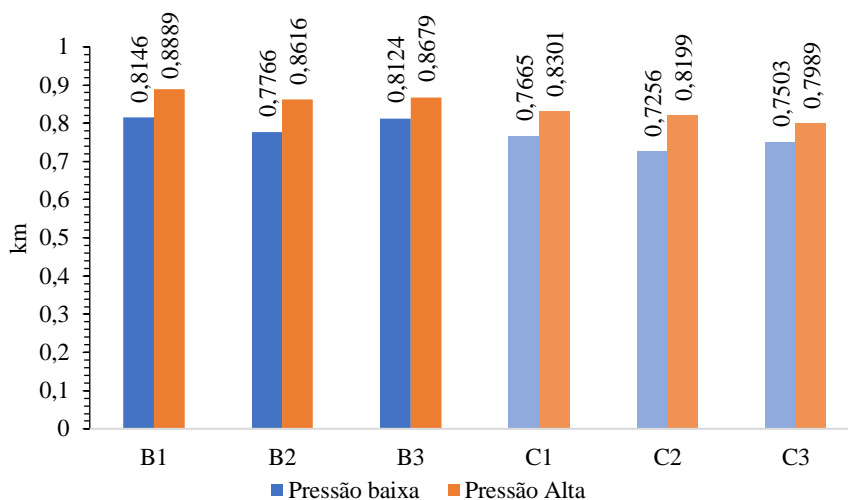


Figura 2.11 - Variação do factor de calibração para diferentes pressões e materiais, (adaptado de [19])

Latka e Matyssek [20], realizaram uma calibração em três tipos de macacos planos: dois de aço com geometria retangular e semi-oval, e outro de alumínio semi-oval. Comparando os valores da calibração

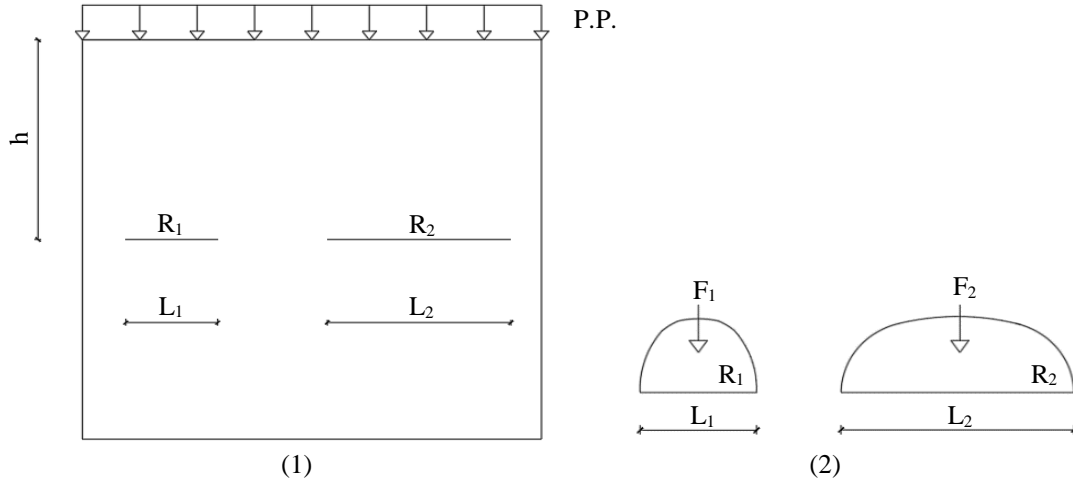


Figura 2.13 - Esquemática da força actuante num rasgo

$$\begin{cases} \sigma_1 = P.P. \times h \\ \sigma_2 = P.P. \times h \end{cases} (=) \sigma_1 = \sigma_2 \quad (2.3)$$

$$\begin{cases} \sigma_1 = \frac{F_1}{A_1} \\ \sigma_2 = \frac{F_2}{A_2} \end{cases} (=) \begin{cases} F_1 = \sigma_1 \times A_1 \\ F_2 = \sigma_2 \times A_2 \end{cases} \quad (2.4)$$

$$\text{Se } L_2 > L_1 \Rightarrow A_2 > A_1 \Rightarrow F_2 > F_1$$

Em que σ é referente à tensão instalada na alvenaria.

O mesmo pode ser aplicado no que trata à área de contacto entre um macaco e a alvenaria. Para um mesmo rasgo com um macaco inserido, mas com dois cenários em que existem duas áreas de contacto distintas, $A_{c1} > A_{c2}$, mas sujeitos a uma mesma força mobilizadora, F , Figura 2.14, o macaco com a área de contacto menor, irá atingir uma pressão maior para alcançar a pressão de cancelamento, expressão (2.7).

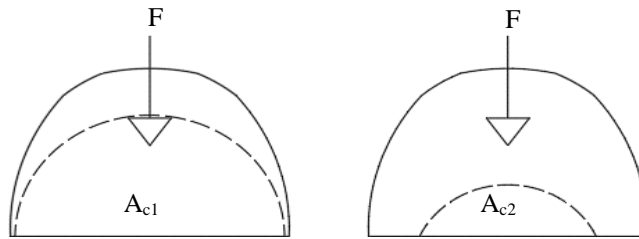


Figura 2.14 - Áreas de contacto diferentes para um mesmo rasgo

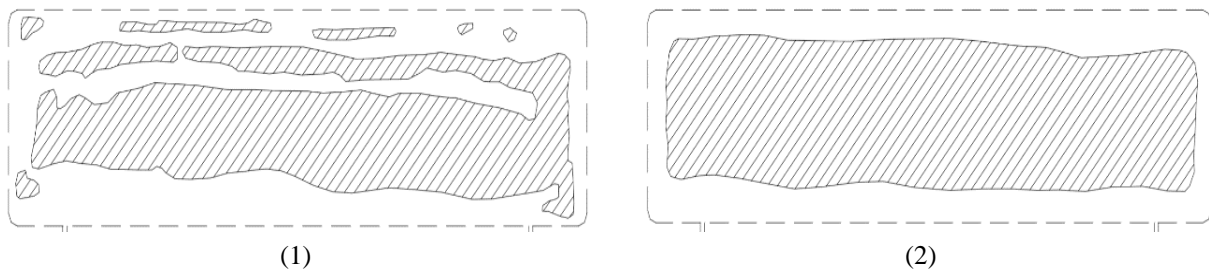
$$\text{Como } A_{c1} > A_{c2} \Rightarrow \begin{cases} \sigma_1 = \frac{F}{A_{c1}} \\ \sigma_2 = \frac{F}{A_{c2}} \end{cases} (=) \sigma_2 > \sigma_1 \quad (2.5)$$

Em que σ é referente à pressão dentro do macaco plano.

Caso não se tenha em conta este fator, que considera a área de contacto entre o macaco e o rasgo, e a área do rasgo, expressão (2.6), o valor da tensão instalada será sobrestimado.

$$k_a = \frac{A_{\text{contacto}}}{A_{\text{rasgo}}} \quad (2.6)$$

Gregorczyk e Lourenço [17] sugerem, para a determinação da área de contacto, a inserção de uma folha de papel químico e papel branco entre o macaco e a alvenaria. A folha ao ser pressionada pelo macaco, marca o papel branco nas zonas de contacto. Foi também estudada a influência da máquina de corte na área de contacto, realizando um corte com berbequim e serra circular, Figura 2.15 - (1), e outro somente com serra circular, Figura 2.15 - (2). Verificou-se uma maior área de contacto para o último caso, cujo rasgo apresentou maior uniformidade. Miranda [18] idealizou um macaco plano que incorpora um sistema de mapeamento de pressões com base em sensores, conseguindo determinar com exatidão o valor da tensão em cada sensor, determinando com maior precisão este factor.



(1) - corte com berbequim e serra circular; (2) - corte com serra circular

Figura 2.15 - Áreas de contacto para diferentes cortes, (adaptado de [17])

Latka e Matysek [20] estudaram a área de contacto entre três tipos de macacos planos: dois de aço, com geometria retangular, P1, e semi-oval, P2, e outro de alumínio semi-oval, P3. Foi adotado um coeficiente W , que exprime o quociente entre a área de contacto e a área do macaco plano, ou seja, existe uma variação linear entre o valor de W e a área de contacto do macaco plano com a alvenaria. Na Figura 2.16, apresenta-se a evolução deste coeficiente para cada patamar de pressão.

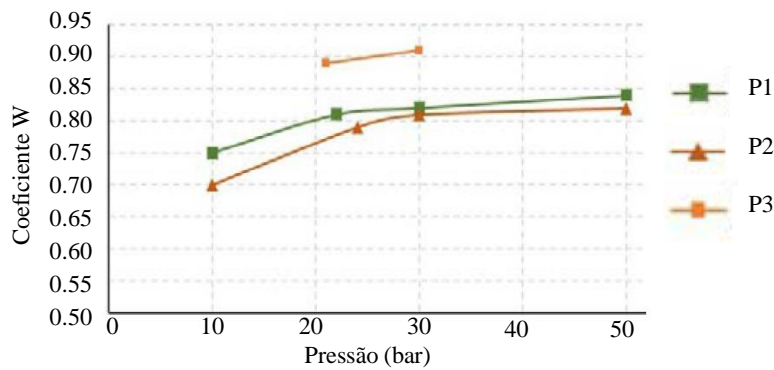


Figura 2.16 - Evolução da área de contacto para cada macaco plano, (adaptado de [20])

Percebe-se que para o macaco de alumínio, P3, o valor da área de contacto é maior, atingindo valores da ordem de 90%. Quanto aos macacos planos de aço, ambos têm valores semelhantes entre si, com o macaco rectangular a atingir um patamar superior.

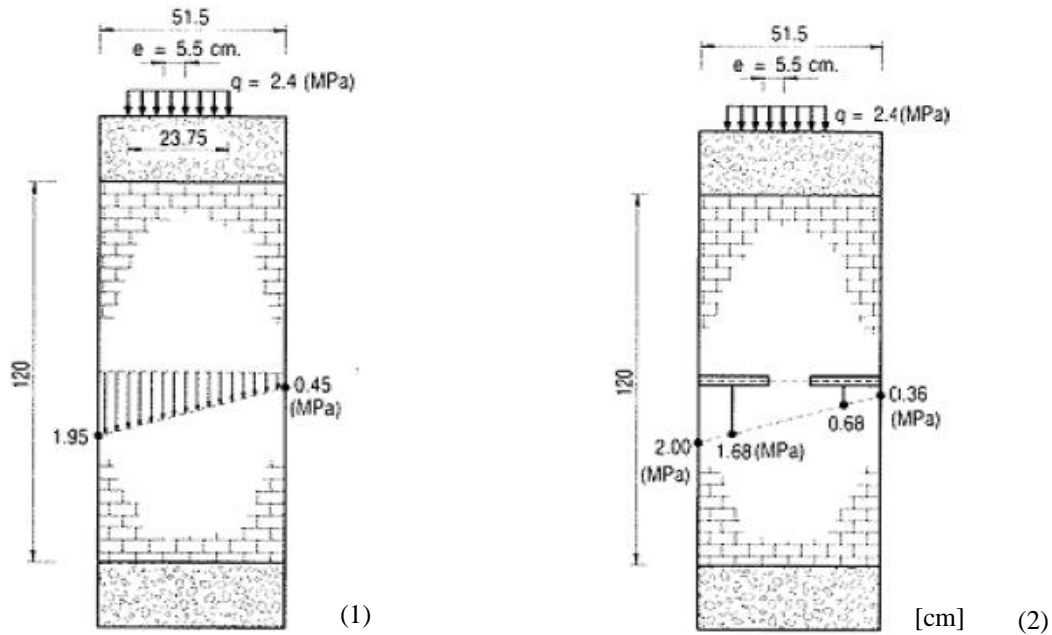
2.6.3. Resultados de ensaios laboratoriais

No início da década de 80, Rossi [12] apresenta um dos primeiros casos de estudo do ensaio de macacos planos em paredes de alvenaria. Neste artigo são descritas as duas fases do ensaio, com a sua aplicação num modelo experimental de alvenaria de tijolo, $1.40 \times 1.40 \times 0.60$ m, submetido a um estado de tensão de 1.00 MPa, Figura 2.17, obtendo-se uma tensão de 1.15 MPa pelo ensaio de macacos planos simples.



Figura 2.17 - Modelo experimental de alvenaria ensaiado por Paulo Rossi em 1982, [12]

Em 1987, Rossi [22] estuda a deteção de carregamentos excêntricos, através do ensaio de macacos planos simples. Num modelo de alvenaria, sujeito a uma carga excêntrica, são realizados dois ensaios em duas faces opostas do modelo. Numa face obteve-se 2.00 MPa e na outra 0.36 MPa, para tensões estimadas de 1.95 e 0.45 MPa, respetivamente.



(1) – estado de tensão existente; (2) – cargas determinadas através do ensaio de macacos planos simples

Figura 2.18 - Estudo de cargas excêntricas com recurso a macacos planos, (adaptado de [18])

Como referido na secção anterior, Latka e Matysek [20] utilizaram diferentes tipos de macacos planos, realizando, para além das análises apresentadas, a vertente simples do ensaio de macacos planos, numa parede de alvenaria de tijolo, $0.38 \times 1.68 \times 1.50$ m, Figura 2.19. Com uma tensão instalada de 1.54 MPa, os valores de tensão atingidos pelos macacos P1 e P2 foram de 1.59 e 1.66 MPa, respetivamente, resultando numa variação máxima de 8%. Foi também utilizado, em conjunto com um alongâmetro, um método de correlação digital de imagens (DIC) [23], que permite medir a variação da distância dos alinhamentos. A diferença entre estes dois métodos de medição foi inferior a 7%.

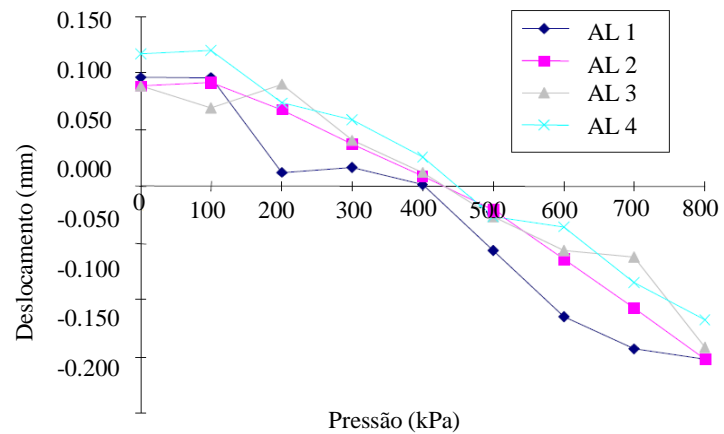


Figura 2.19 - Parede de alvenaria com máquina de corte acoplada, [20]

Gregorczyk e Lourenço [17], testaram num modelo experimental de alvenaria de tijolo, Figura 2.20 - (1), a aplicação do ensaio de macacos planos simples. Na Figura 2.20 - (2), observa-se a evolução de um dos dois ensaios analisados. Com a pressão de cancelamento de cada alinhamento, calculou-se o valor da pressão de cancelamento média, $P_{cm} = 420$ kPa. A variação obtida para a tensão instalada foi de 22 % e de 18 % para o restante ensaio.



(1)



(2)

(1) - modelo experimental; (2) - resultados do ensaio simples

Figura 2.20 - Ensaio de macacos planos simples, (adaptado de [17])

S. Parivallal et al. [24], utilizaram duas paredes de alvenaria de tijolo, $1.20 \times 1.00 \times 0.34$ m, para a realização do ensaio de macacos planos simples, em conjunto com quatro a 5 alinhamentos e um alongômetro. Para a medição da área de contacto, utilizou-se o papel químico mencionado na secção anterior. Foram aplicados incrementos de 3 a 4 bar e determinada a pressão de cancelamento média P_{cm} , corrigindo-a com os coeficientes K_a e K_m , obtendo-se a tensão instalada, σ , em cada modelo. A variação dos dois ensaios foi de -1.16 % e 14.12 %, Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Valores obtidos pelo ensaio de macacos planos simples

	Tensão instalada (MPa)	P_{cm} (bar)	K_a	K_m	σ (MPa)	Variação (%)
Modelo 1	0.86	22.04	0.54	0.71	0.85	-1.16
Modelo 2	0.85	28.24	0.48	0.71	0.97	14.12

E. Manning et al. [25], construíram um modelo experimental de granito, Figura 2.21 - (1), assente em argamassa de cal e cimento, e com uma espessura de 20 cm. Foi utilizado um macaco plano retangular, de 40.60×10.00 cm, com um fator de calibração de 0.8 e determinado um fator de área de 0.496. A medição do deslocamento fez-se com recurso a um alongômetro e diversos LVDT's colocados após o corte. Aplicaram-se dois ciclos de carga durante o ensaio, Figura 2.21 - (2), notando-se que, após o primeiro ciclo, o rasgo retomou aproximadamente a posição original antes do carregamento. Com uma

tensão instalada de 0.20 MPa, a pressão de cancelamento média atingiu 0.36 MPa, resultando numa variação entre a tensão experimental e real de 80 %.

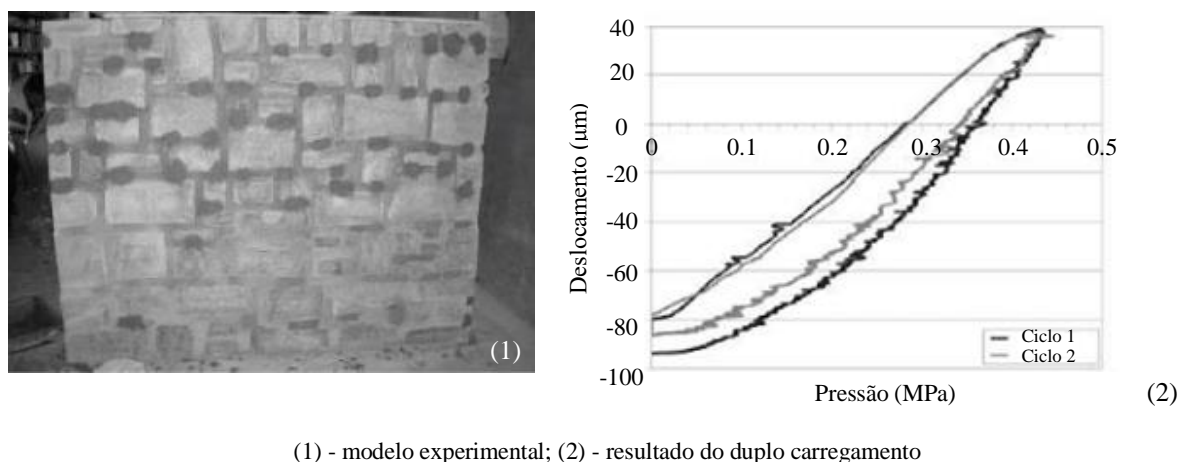


Figura 2.21 - Ensaio de macacos planos simples, (adaptado de [25])

2.6.4. Resultados de ensaios *in-situ*

Em 2004, Pagaimo [26] apresenta um estudo na vila de Tentúgal, cujo edificado é constituído por alvenaria de pedra calcária, composto por quatro ensaios, dos quais apenas foram considerados dois resultados devido à desagregação da alvenaria. Nos ensaios realizados, obtiveram-se variações de 150 % e 66.70 %.

Em 2011, Miranda [18] discute ensaios em diversos edifícios de alvenaria de pedra de granito, na zona Norte do País. São realizados cinco ensaios, com variações entre -69.40 % e 86.40 %. São também desenvolvidas chapas metálicas, Figura 2.22, que permitem uma fácil remoção, findado o ensaio de macacos planos.

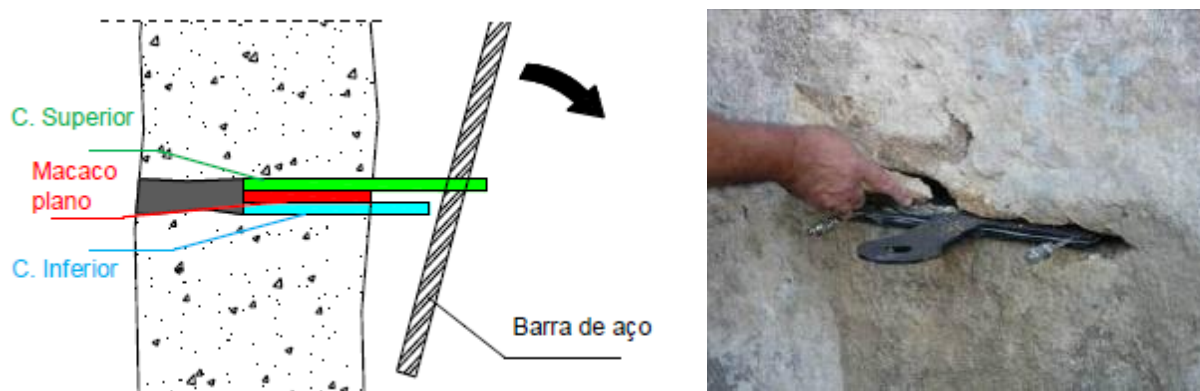


Figura 2.22 - Esquematisação e aplicação *in-situ* das chapas desenvolvidas por Miranda, (adaptado de [18])

Em 2015, Vicente et al. [27], realizaram vários ensaios de macacos planos no Centro Histórico de Coimbra, cujo edificado é composto maioritariamente por paredes de alvenaria de calcário. Para o ensaio simples, foram utilizados macacos planos semi-rectangulares, com $40.00 \times 10.00 \times 0.40$ cm, dimensões

que se adaptavam à máquina de corte. Na Tabela 2.3, apresenta-se a variação da tensão estimada no local relativamente à obtida com macacos planos. O autor apresenta várias razões para os valores obtidos, entre as quais a proximidade com zonas de canto ou aberturas e alta percentagem de argamassa ou vazios.

Tabela 2.3 - Variações de ensaios realizados em Coimbra, (adaptado de [25])

Ensaio	Tensão estimada (MPa)	Tensão obtida (MPa)	Variação (%)
E1	0.19	0.36	-46
E2	0.24	0.258	-6
E3	0.25	0.145	70
E4	0.18	0.081	119
E5	0.18	0.24	-26
E6	0.11	0.062	77
E7	0.11	0.139	-21
E8	0.18	0.111	60
E9	0.23	0.162	40

Schuller [28], apresenta um caso de estudo de ensaios simples, num edifício de 42 andares, onde se desenvolveram tensões significativas na fachada de alvenaria de tijolo, observando-se a variação da tensão de compressão ao longo do edifício. Como seria de esperar, à medida que se analisa uma altura superior, o valor da tensão diminui, Figura 2.23.

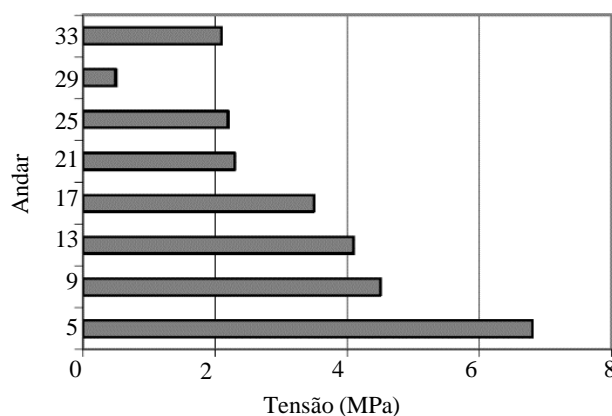
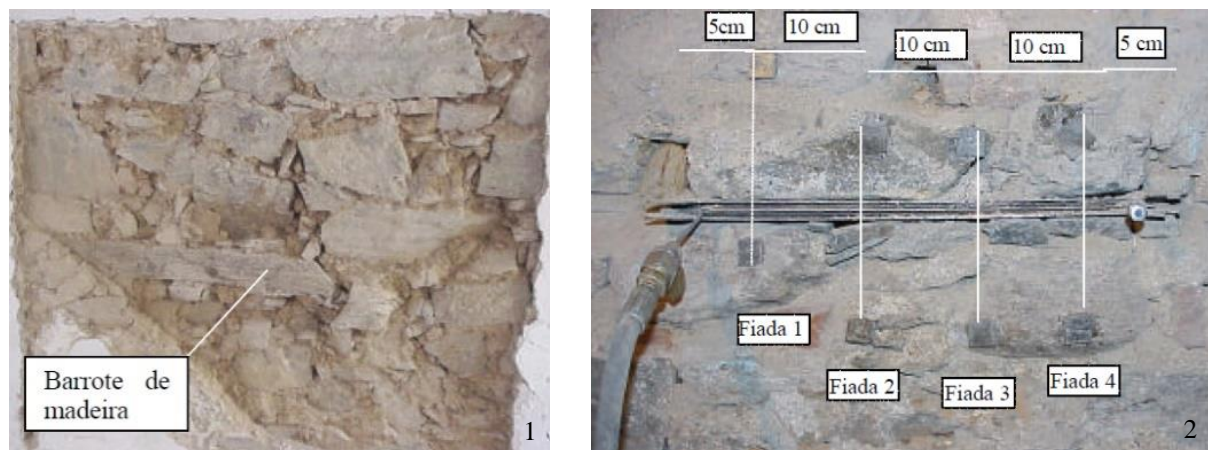


Figura 2.23 - Análise do estado de tensão num edifício de 42 andares, (adaptado de [28])

Em 2013, Roque e Lourenço [29] estudaram no Centro Histórico de Bragança, paredes mestras de alvenaria irregular de xisto, com recurso a ensaios de macacos planos. Em casos semelhantes ao apresentado, a escolha do local para a realização do rasgo é difícil, devido à configuração irregular do

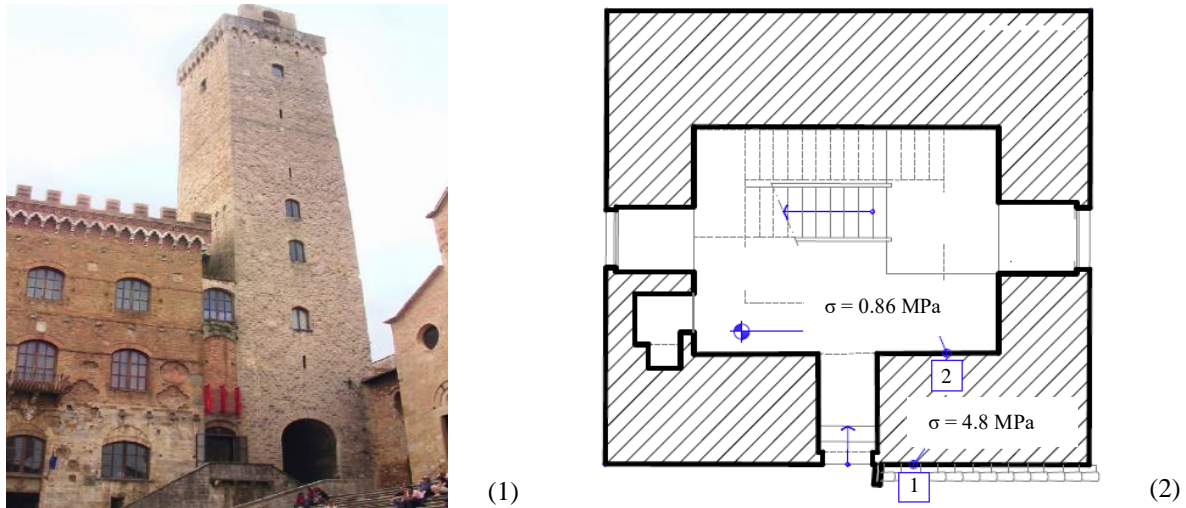
elemento. Para além disso, é comum neste tipo de construções encontrar elementos com fraca coesão ou que sinalizam uma construção pobre, Figura 2.24 - 1, dificultando a escolha e realização do corte. A colocação das miras é também influenciada pela irregularidade das faces do paramento, Figura 2.24 - 2. Foram realizados 3 ensaios com macacos planos retangulares com $10.20 \times 40.60 \times 0.38$ cm. As variações obtidas relativamente à tensão instalada no local são de 8.3 % e -8.3 % para os dois primeiros ensaios e de 7.1 % para o último ensaio.



1 - janela de ensaio com elemento invulgar; 2 - posição das miras para o ensaio simples

Figura 2.24 - Estudo realizado no Centro Histórico de Bragança, (adaptado de [29])

B. Gianni et al. [30] analisa a “*Torre Grossa*”, uma construção do século XIII com 55 metros de altura, em San Gimignano, Itália, Figura 2.25 - (1). As paredes são de pano triplo, com a parede exterior composta por blocos de alvenaria calcária de 30 cm de espessura e a interior por alvenaria de tijolo, de 25 cm de espessura. O autor reforça a noção de que, devido ao valor histórico deste património, é necessário preservar a integridade do monumento, recorrendo a ensaios de macacos planos para caracterizar o elemento. Foram realizados diversos ensaios simples, com macacos planos de $35.00 \times 26.00 \times 0.35$ cm, factor de calibração de 0.96 e um fator de área assumido como 1. Entre os ensaios efetuados, é de notar os valores obtidos à cota de 20.05 m, em que a tensão no paramento exterior, 4.80 MPa, é bastante superior à interior, 0.86 MPa, Figura 2.25 - (2). O autor refere um caso semelhante, estudado por Binda et al. [31], em que esta diferença é justificada pelo destacamento do pano exterior. No entanto, para o presente caso, a justificação para a diferença de tensões é relativamente ao contraste de rigidez entre os panos do paramento, com o elemento mais rígido a sustentar uma maior carga. Outros valores de tensão obtidos, variam até um máximo de 6.70 MPa.



(1) - Torre Grossa; (2) - localização dos ensaios e valores obtidos à cota de 20 m

Figura 2.25 - Torre Grossa, Siena, Itália, (adaptado de [30])

Arêde et al. [32], analisaram duas pontes ferroviárias em arco, de alvenaria de granito. A ponte de Durrães em Barcelos, Figura 2.26 - 1 e São Pedro da Torre em Valença Figura 2.26 - 2, com dois ensaios simples realizados na base das colunas de cada uma. Para a ponte de Durrães, obtiveram-se valores na ordem dos 1500 kPa e para a de São Pedro da Torre ocorreu uma maior disparidade, com valores de 198 e 986 kPa.



1 - ponte de Durrães, Barcelos; 2 - ponte de São Pedro da Torre, Valença

Figura 2.26 - Pontes analisadas por Arêde et al., [32]

2.7. Ensaio de macacos planos duplos

Rossi [12] menciona que, para materiais homogêneos e isotrópicos, a utilização do ensaio simples, pode também ser utilizada para determinar as características de deformabilidade. Contudo, para elementos anisotrópicos, sugere a realização de um segundo rasgo paralelo ao do ensaio simples, no qual é inserido um segundo macaco plano, delimitando-se uma zona de área de ensaio superior, na qual é aplicado um estado de tensão, Figura 2.27.

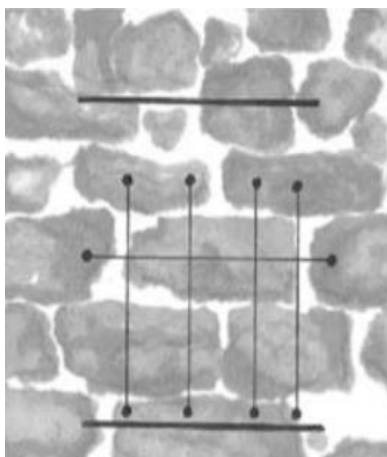


Figura 2.27 – Esquematisação do ensaio de macacos planos duplos, [16]

Neste ensaio duplo, são então utilizados dois macacos planos e é normalmente antecedido pelo ensaio simples. Através de ciclos de carga simultâneos, impostos pelos macacos à alvenaria, é obtida a extensão da alvenaria. Esta deformação, vertical e horizontal, é usualmente obtida com recurso a LVDT's, já que estes podem ser colocados previamente ao corte, ao contrário do ensaio simples. Através de sucessivas recargas, consegue-se um gráfico de tensão-deformação, do qual é possível obter o módulo de elasticidade do elemento analisado. É também possível obter a resistência à compressão, manifestando-se pela ausência de reação à aplicação da tensão no macaco [29], [27].

Andreini et al. [33] realizaram testes *in-situ*, em alvenaria de blocos calcários e tijolo, assentes em argamassa de cal. Após a instalação de diversas miras, quatro horizontais e uma vertical, Figura 2.28, foram aplicados diversos ciclos de carga e descarga, com incrementos de 0.30 e 0.50 bar. A resistência à compressão variou entre 0.8 e 1.2 MPa e o módulo de elasticidade entre 400 e 800 MPa.



Figura 2.28 - Ensaio de macacos planos duplos *in-situ*, [33]

Vicente et al. [27], para além do mencionado na secção anterior, fizeram também diversos ensaios duplos, comparando os valores da tensão instalada, retirados dos ensaios simples, com os da resistência à compressão, obtidos pelos ensaios duplos.

Roque e Lourenço [29], realizaram o ensaio duplo com incrementos sucessivos de pressão até à rotura da parede, sem a aplicação de cargas cíclicas. Obtiveram valores entre 0.40 e 1.00 MPa para a tensão de rotura e 0.30 e 2.20 GPa para o módulo de elasticidade.

2.8. Teste de Tube-Jack

Com o ensaio de macacos planos, a irregularidade da alvenaria torna-se um inconveniente, pois o corte não pode ser feito na sua totalidade, na junta. Em 2010, Ramos e Sharafi [34], apresentam um método em todo semelhante ao de macacos planos, com a exceção de, ao invés de utilizar um macaco plano, utilizam tubos, “tube-jacks”, capazes de desempenhar o mesmo papel.

Foi modelado um elemento de alvenaria, com uma carga distribuída de 0.40 MPa e simulados ensaios de tube-jack e macacos planos simples e duplos. Para o estado de tensão, foram obtidos no tube-jack e macacos planos, 0.40 e 0.38 MPa, respetivamente. Na análise do módulo de elasticidade, o valor de macacos planos duplos aproximou-se bastante do valor modelado, no entanto, para o tube-jack, o mesmo não se verificou.

Em 2016, Manning et al. [25] apresentam um caso experimental onde esta metodologia é aplicada numa parede de alvenaria de granito. A determinação do estado de tensão, torna-se mais complexa do que no ensaio de macacos, pois o cálculo da pressão que os tubos aplicam na alvenaria, tem em conta propriedades geométricas e físicas do material que constitui as tubagens. Foi aplicada uma tensão de 0.20 MPa, para se proceder à realização de ensaios de tube-jack e macacos planos, Figura 2.29. É de notar que as perfurações na junta de argamassa demoraram duas horas e meia.

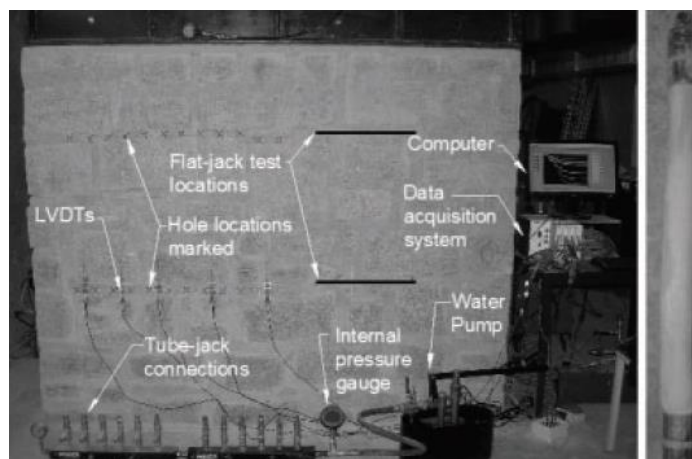


Figura 2.29 - Janela de ensaios para tube-jack e macacos planos, (adaptado de [25])

Para o ensaio simples de tube-jacks, não foi possível repor a distância inicial antes do corte. O resultado do ensaio de macacos planos simples é apresentado na secção 2.6.3. Para a caracterização do módulo de elasticidade, o valor obtido por tube-jacks ficou também muito aquém do esperado, devido a uma interferência com os LVDT's colocados e a rotura de um dos tubos.

Novamente, Manning et al. [35] apresentam uma modelação numérica de ensaios simples, comparando a vertente de macacos planos e tube-jacks, e com ensaios experimentais obtidos numa publicação prévia. O programa de elementos finitos, DIANA, foi utilizado para modelar uma parede de alvenaria de granito, com uma tensão instalada de 0.20 MPa. Os valores modelados indicam uma tensão de 0.225 MPa para o ensaio simples e de 0.229 MPa para o de tube-jack simples. Quanto aos valores experimentais, obteve-se 0.26 MPa para o ensaio de tube-jack e 0.33 MPa para o de macacos planos simples.

2.9. Caso de estudo do estado de tensão de um edifício pombalino

Com o objetivo de preservar e também de melhorar o desempenho do edificado histórico, advém a necessidade de realizar alterações estruturais e/ou espaciais, carecendo de um estudo aprofundado das características geométricas e físicas dos materiais, e da ligação entre eles. Muitas vezes este aspeto não é respeitado, surgindo elementos estranhos, sem qualquer tipo de projeto ou documento que identifique as alterações efetuadas e que não respeitam a autenticidade do património. No âmbito do que foi apresentado nas secções anteriores e dada a inexistência de uma análise do estado de tensão de compressão num edifício característico da Baixa Lisboeta, apresenta-se, de seguida, a elaboração aproximada de um estudo representativo dessas mesmas tensões, incidente num edifício pombalino situado nos Restauradores.

Neste estudo não se consideraram as alterações já existentes, não só pela complexidade acrescida, mas também pelo que foi referido no parágrafo anterior, assim como as que estavam projetadas, nomeadamente o acrescento de uma estrutura metálica para ampliação do último piso.

Apresenta-se na Figura 2.30, o alçado frontal e planta de um piso intermédio do edifício em questão. Trata-se de uma configuração típica pombalina, com um núcleo de escadas em tabique duplo, paredes de frontal constituídas por Cruzes de Santo André, pavimento de madeira e paredes exteriores espessas de alvenaria. As paredes de tabique, são normalmente caracterizadas por possuírem uma espessura inferior às de frontal, assumindo um papel meramente de compartimentação. No entanto, podem também assumir um papel estrutural, sendo exemplo disso, as paredes do núcleo de escadas do edifício em análise.



Figura 2.30 - Alçado frontal e planta do edifício pombalino em estudo

O cálculo do estado de tensões fez-se para a zona mais solicitada, alçado de empena lateral direita, considerando-se o peso específico da parede de alvenaria, $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$ [36], do pavimento, $\gamma = 1.44 \text{ kN/m}^2$ [37] e uma sobrecarga, $\gamma = 2 \text{ kN/m}^2$ [38]. Não foi considerado o peso do telhado. A distribuição da carga do pavimento fez-se de acordo com a Figura 2.31, considerando um vão de 9 metros, em que metade desse vão descarrega no núcleo de escadas e a outra metade no alçado de empena, sem influência das paredes de frontal.

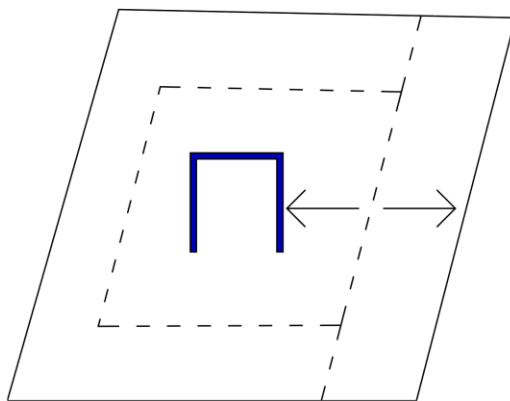


Figura 2.31 - Distribuição das cargas do pavimento

Somando o peso específico do pavimento com a sobrecarga, obtém-se um valor de 3.44 kN/m^2 , ao que multiplicado pelo vão de 4.50 metros, resulta numa carga linear de 15.48 kN/m . Distribuindo essa carga pela espessura da parede assumida como constante, 70 cm, obtém-se uma tensão actuante na parede de empena, devido ao pavimento, de 22.11 kN/m^2 . A tensão total na base da parede, é obtida pela multiplicação do peso específico da parede pela sua altura, somando-se a tensão exercida pelos quatro pavimentos que descarregam na parede, expressão (2.7). Obtém-se assim um estado de tensão de compressão, para a cota 0 do edifício, de 392.5 kPa . O diagrama de tensões, é apresentado na Figura 2.32. A ordem de grandeza do estado de tensão de compressão, num edifício característico da Baixa Lisboa, é assim de 400 kPa .

$$18 \times 16.9 + 22.1 \times 4 = 392.5 \text{ kPa} \quad (2.7)$$

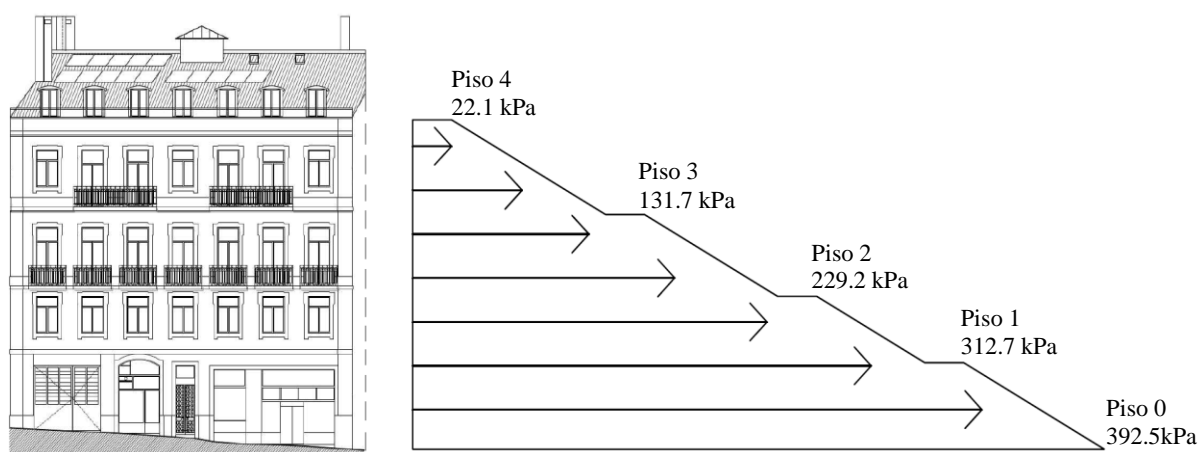


Figura 2.32 - Estado de tensão para o edifício em estudo

Capítulo 3

Programa Experimental

3.1. Introdução

A componente experimental do trabalho é composta por três ensaios de macacos planos simples, com os quais se pretende determinar a precisão desta metodologia, numa parede de alvenaria de pedra calcária, assente em argamassa de cal hidráulica natural e areia, sujeita a uma tensão de 500 kPa.

Descreve-se de seguida o modelo experimental ensaiado, dificuldades encontradas na sua preparação, aplicação da carga vertical, procedimentos adotados e conjunto de equipamentos que formam o ensaio.

3.2. Caracterização do modelo experimental

Em janeiro e fevereiro de 2012, foram construídos, na FCT NOVA, sete modelos experimentais de alvenaria, sendo um deles destinado à verificação do posicionamento de ancoragens e os restantes destinados a ensaios de arrancamento, Figura 3.1. Todos os modelos foram executados sobre bases em betão armado com 0.25 m de altura, apoiadas em betonilha de regularização. No modelo M1, foi executado um lintel com 0.15 m de espessura e lajes com 0.20 m nos restantes, destinado a reproduzir o efeito de confinamento associado à compressão vertical existente numa parede real e a garantir a aplicação das cargas verticais. Tratam-se de modelos de diferentes geometrias, maximizando a quantidade de ensaios possíveis e refletindo também situações correntes, como cunhais de paredes de alvenaria [39].



Figura 3.1 - Modelos experimentais de alvenaria construídas em 2012, [39]

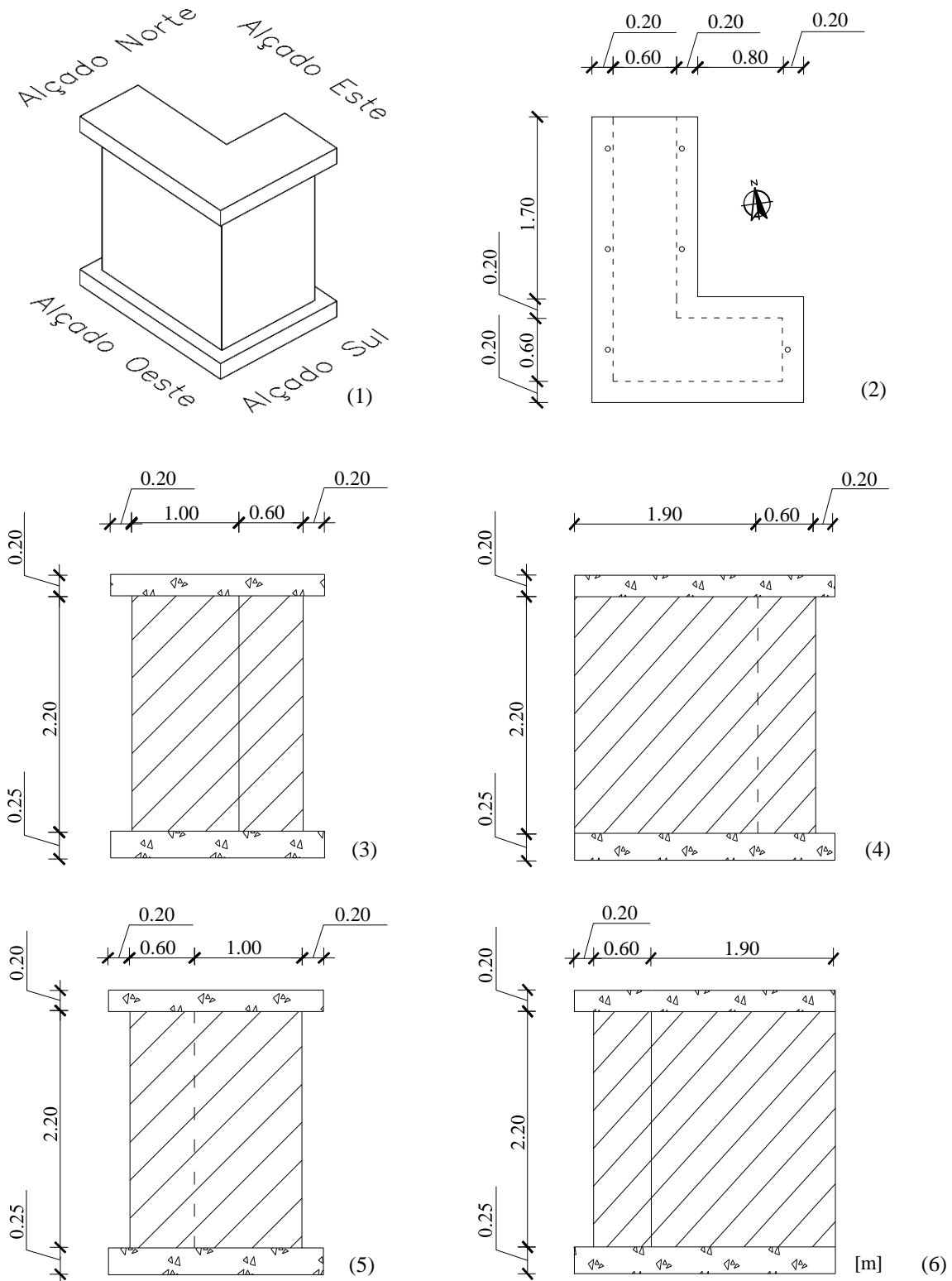
Para a realização da presente campanha experimental, foi utilizado o modelo C1, Figura 3.1 e 3.2.



1 - alçado Norte; 2 - alçado Oeste; 3 - alçado Este; 4 - alçado Sul

Figura 3.2 - Modelo experimental de alvenaria C1

O modelo C1, é composto por alvenaria de pedra calcária, assente com argamassa de cal hidráulica natural e areia ao traço de 1:3, com uma resistência aos 28 dias de 1.85 MPa [39]. As dimensões do modelo, em planta e alçado, apresentam-se na Figura 3.3.

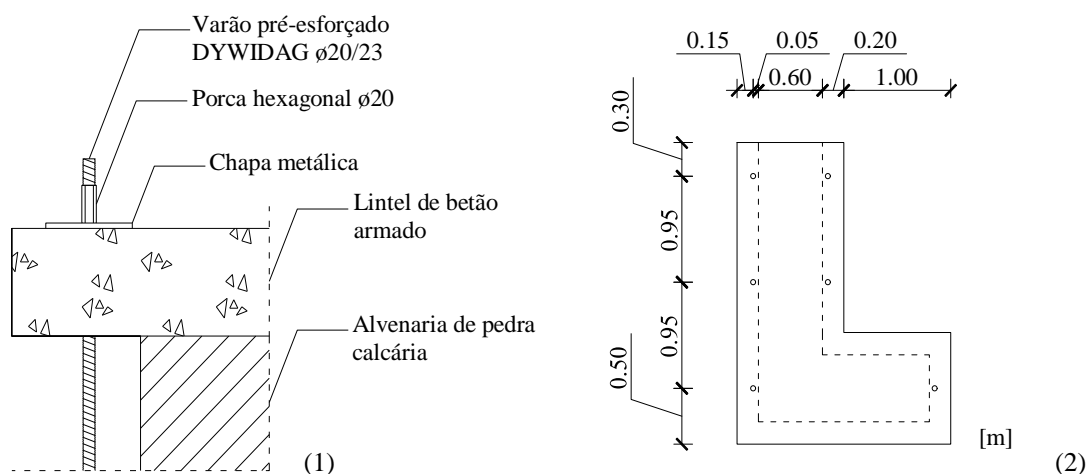


(1) - representação isométrica; (2) - planta; (3) - alçado Norte; (4) - alçado Oeste; (5) - alçado Sul; (6) - alçado Este

Figura 3.3 - Dimensões da parede de alvenaria C1

3.3. Aplicação da carga vertical no modelo

Como a altura da alvenaria existente nos modelos é reduzida e querendo-se atingir uma tensão de 500 kPa, o peso volúmico da alvenaria, $\gamma_{alv} = 18 \text{ kN/m}^3$ [36], é insuficiente para atingir este patamar de tensão. Neste sentido, foi necessário aplicar uma tensão através de um carregamento vertical, até à obtenção do referido valor, com recurso a diversos varões pré-esforçados, fixos na base e na laje de betão armado, Figura 3.4 – (1), e dispostos de acordo com a Figura 3.4 – (2).



(1) - esquema de confinamento; (2) - disposição, em planta, dos varões instalados

Figura 3.4 - Confinamento e posição dos varões de confinamento do modelo C1

Para atingir o valor de tensão proposto, 500 kPa, e dada a geometria do modelo, foi necessário calcular a força em cada varão, através da área de influência adotada para cada um, Figura 3.5, e respetivos valores, Tabela 3.1.

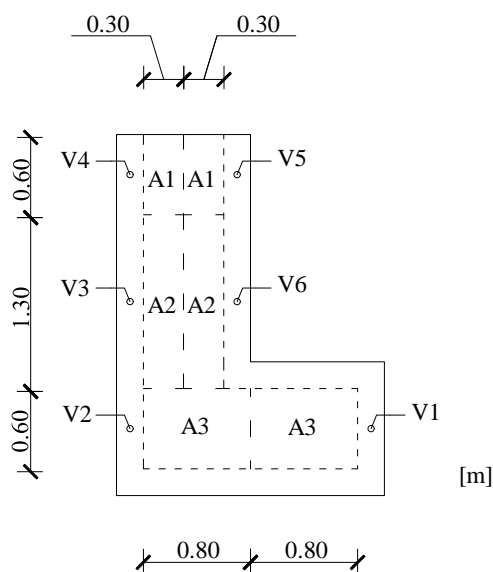


Figura 3.5 - Esquemática da área de influência de cada varão

Com os valores das áreas de influência, é possível calcular a força a aplicar em cada varão para atingir o estado de tensão pretendido, recorrendo à expressão (3.1):

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3.1)$$

Em que, σ é tensão a instalar, F é a força de tração a aplicar em cada varão e A é área de influência de cada varão.

Tendo em conta o peso volúmico da alvenaria, da laje de betão armado e assumindo que os cortes se irão realizar a meia altura, sabe-se que a contribuição destes elementos para a tensão instalada na parede é de 32.35 kPa. Subtraindo este valor aos 500 kPa pretendidos, restam 467.65 kPa que serão garantidos com o confinamento dos varões. Ao multiplicar este valor pela área de influência de cada varão, resulta a força de tração necessária nesse mesmo varão. Na Tabela 3.1, encontram-se os valores das forças de tração a aplicar, para a tensão respeitante aos varões.

Tabela 3.1 - Área de influência e respetiva força por varão

Varão	Área de influência (m ²)	Força (kN)
V1	0.48	224.48
V2	0.48	224.48
V3	0.39	182.38
V4	0.18	84.18
V5	0.18	84.18
V6	0.39	182.38
Total	2.10	982.07

Dividindo os valores de força e área totais, e somando o peso próprio do lintel e da alvenaria, é possível a confirmação dos cálculos, já que, através deste quociente, se obtém a contribuição da tensão promovida pelo confinamento dos varões, expressão (3.2):

$$\frac{\Sigma F_t}{\Sigma A_t} + 32.35 = 500 \text{ kPa} \quad (3.2)$$

De forma a assegurar um tensionamento seguro dos varões, foi necessário garantir que a força aplicada nos varões mais solicitados, não ultrapassa a sua tensão de cedência, sendo necessário saber a classe de resistência dos varões em questão. Inicialmente, a única informação que se tinha relativamente a estes, era o fabricante (DYWIDAG). Por conseguinte, determinou-se o diâmetro da face lisa e nervurada, com um paquímetro, Figura 3.6.



Figura 3.6 - Determinação do diâmetro dos varões através de um paquímetro digital

Com esta informação, identificaram-se os varões como Barras DYWIDAG, com uma classe de aço de St900/1100 e um diâmetro de 20/23 mm, confirmando-se através do contacto com um representante da marca. Sabendo a classe do aço e a área dos varões, determinou-se a força de cedência, utilizando a expressão (3.1). Esta força é de 282.74 kN, ultrapassando assim a força máxima que se irá aplicar nos varões, de 224.48 kN. Uma vez que a resistência do varão é maior que a ação nele exercida, existem condições de segurança para aplicar a força calculada, atingindo a tensão necessária na parede.

Quanto ao equipamento necessário ao tensionamento, este passa pela utilização de macacos hidráulicos assentes em “cubos” de aço, intercalados por células de carga e chapas metálicas, e delimitados por porcas hexagonais, Figura 3.7.

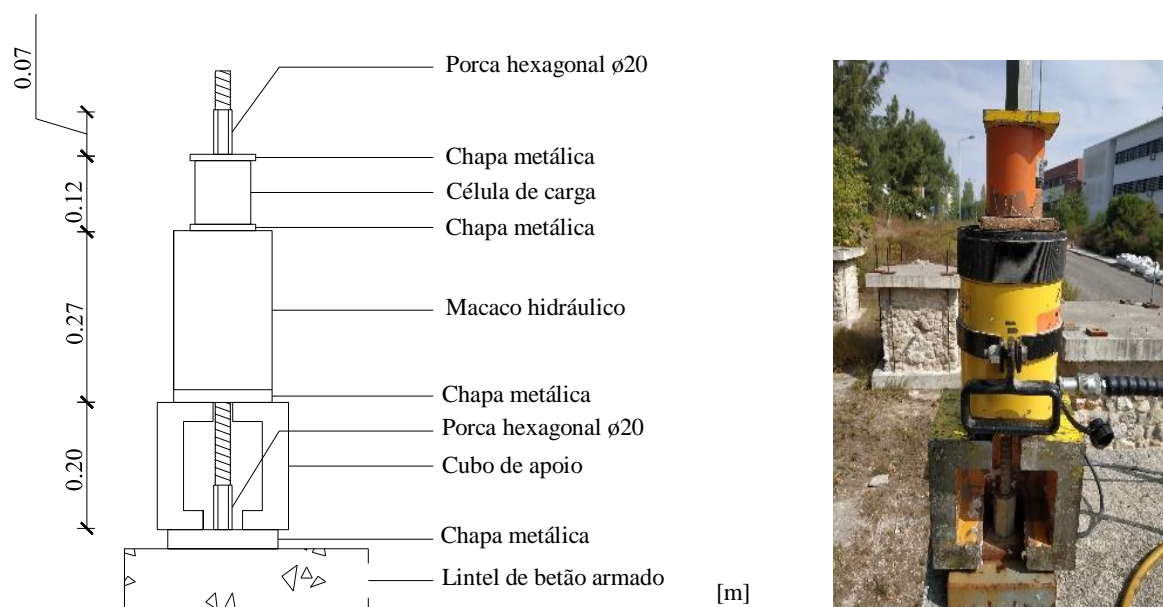
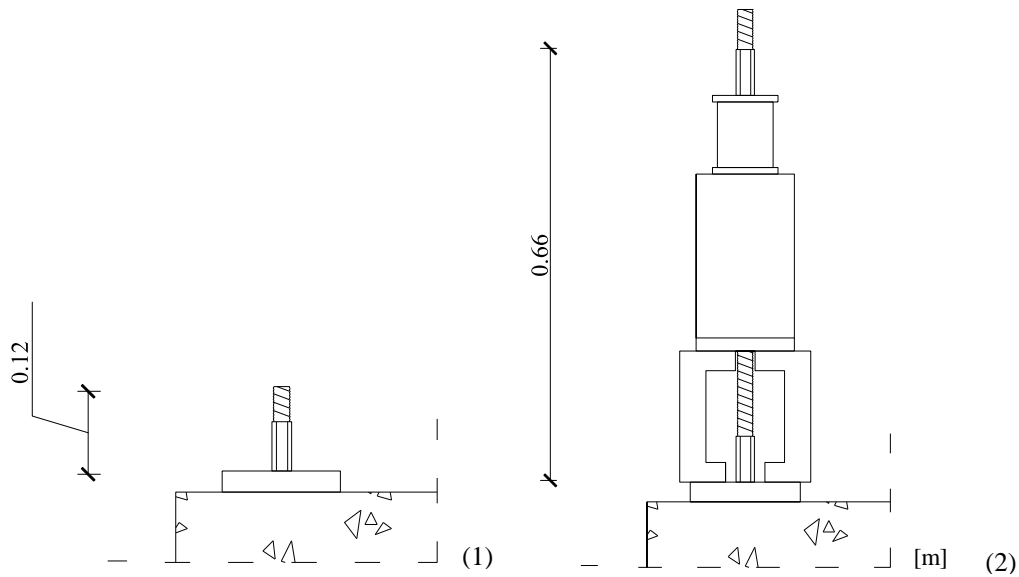


Figura 3.7 - Esquema e aplicação do equipamento necessário ao tensionamento dos varões

No entanto, a altura útil - altura existente acima da chapa metálica - dos varões é muito reduzida, Figura 3.8 - (1), sendo significativamente inferior à altura total do equipamento necessário à aplicação da força, Figura 3.8 - (2).



(1) - altura útil dos varões presentes no modelo experimental C1; (2) - altura do equipamento necessário à instalação da força

Figura 3.8 - Diferença entre a altura útil e altura necessária nos varões

Para aumentar esta altura, retiraram-se seis varões do modelo experimental B1, com cerca de um metro de comprimento, uma vez que estes são iguais aos utilizados no modelo a ensaiar. Todos os varões cortados foram limpos, dada a sua exposição prolongada às intempéries. Foi aplicado o mesmo processo a todos os varões do modelo C1, a vinte centímetros da base inferior do lintel, Figura 3.9 - (1) e (2), para que, com acopladores adquiridos pela DYWIDAG, Figura 3.9 - (3), se possa fazer a união entre os varões existentes e aqueles cortados do bloco B1, Figura 3.9 - (3) e (4), atingindo assim uma altura útil superior à altura total do equipamento.

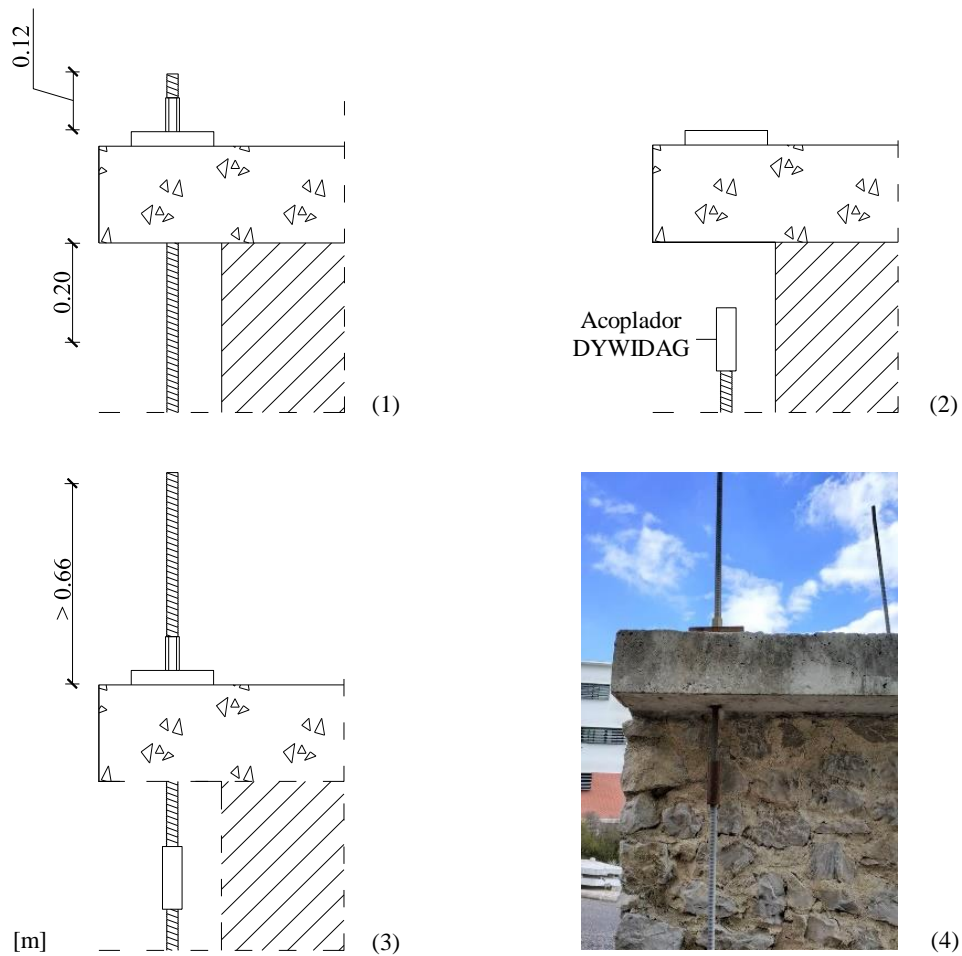


Figura 3.9 - Procedimento de substituição dos varões existentes no modelo experimental

Na base do varão V1, observou-se uma fenda, havendo a necessidade de a reforçar, uma vez que se tratava da base de um dos varões mais tracionados. Utilizaram-se quatro varões roscados de vinte milímetros de diâmetro, embebidos com um químico de injeção epóxi de alto desempenho, da marca comercial HILTI. Estes varões inseriram-se em perfurações criadas com uma broca, Figura 3.10 [40].

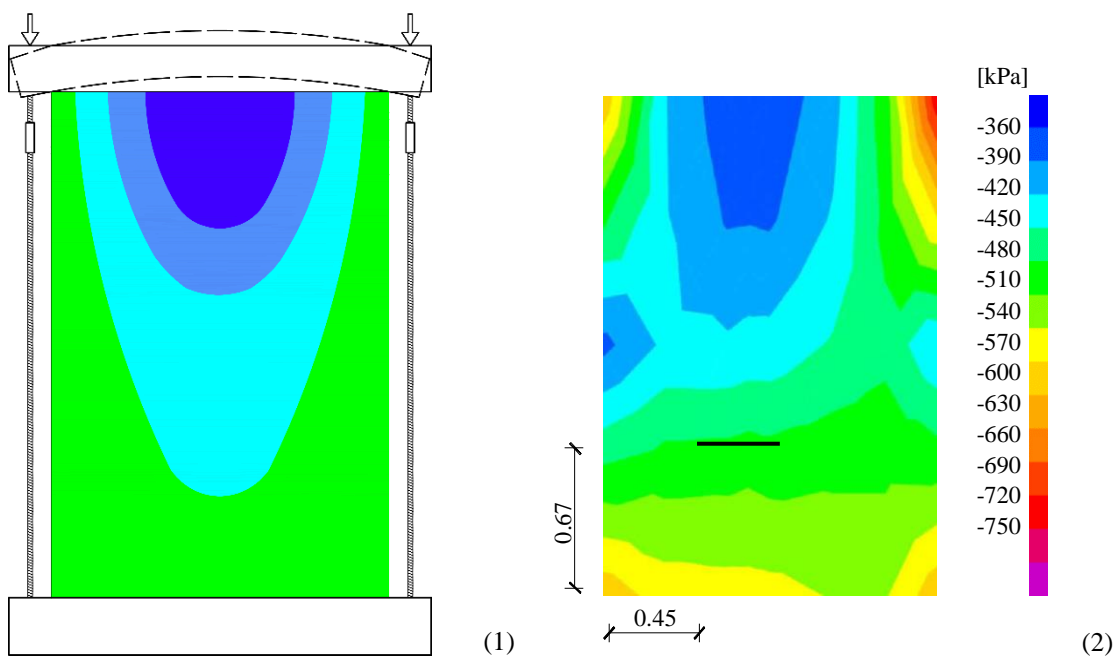


Figura 3.10 - Reforço efetuado na base do varão V1

3.3.1. Modelação SAP2000

Entre os varões V1 e V2, observa-se um vão com cerca de 2 m, sob o qual se encontra a face sul do modelo experimental. Dado que um dos ensaios a realizar se encontra nesta face, mostrou-se relevante perceber se, no local do ensaio, existe um “bolbo” de tensões inferiores ao calculado, devido a esse vão, Figura 3.11 - (1), já que a tensão calculada não corresponderia à tensão instalada no local do corte. Com o intuito de perceber a dispersão de tensões nesta face, criou-se um modelo no SAP2000 para analisar a parede de alvenaria C1. Este é um modelo simplificado, que não retrata a heterogeneidade da alvenaria. A translação dos nós na base do modelo foi bloqueada em todas as direções, simulando a sua fixação ao terreno e a carga aplicada por forças pontuais na laje, na posição de cada varão.

Percebe-se pela Figura 3.11 - (2), que existem realmente valores de tensões inferiores ao calculado, contudo, estes atingem apenas cerca de 1.00 m abaixo da laje. Uma vez que o ensaio experimental nesta face se encontra a 0.67 m acima da base de betão armado, pode-se admitir que o valor da tensão real, obtida para a zona do rasgo, é realmente a calculada. Deste modelo, foram também retirados os valores de tensões dos outros dois locais a ensaiar, para comparar com os valores obtidos pelos ensaios experimentais.



(1) - patamares de tensões teorizados; (2) - patamares de tensões, de acordo com o modelo experimental modelado e posição do rasgo efetuado

Figura 3.11 - Dispersão de tensões na face sul do modelo experimental

3.3.2. Procedimento e material necessário

Com os varões instalados, é finalmente possível aplicar a força correspondente a cada um. O material necessário encontra-se esquematizado na Figura 3.7 e descrito na Figura 3.12. Dado que a força é aplicada em quincôncio, foram necessárias duas unidades de cada material.



1 - porcas hexagonais; 2 - células de carga com capacidade de 300 kN; 3 - bombas manuais ENERPAC; 4 - macacos hidráulicos com 500 kN de capacidade; 5 - válvulas com manómetro incorporado, para ligação entre o macaco hidráulico e mangueiras ENERPAC; 6 - cubo de apoio ao macaco hidráulico

Figura 3.12 - Equipamento necessário ao tensionamento dos varões

Dada a altura do muro e o peso do equipamento, este foi elevado até ao topo com o auxílio de uma empilhadora. Seguidamente, foi montado o aparato, Figura 3.13 - 1 e 2, conforme esquematizado anteriormente, Figura 3.7. Para monitorizar e registar a evolução da força ao longo do tempo, em cada varão, utilizou-se um computador instalado com o *software* Catman, ligado a um instrumento de aquisição de dados, SPIDER8, Figura 3.13 - 3 e 4.



1 - montagem do equipamento; 2 - disposição geral; 3 - equipamento de aquisição de dados, Spider8; 4 - ligação entre o Spider8 e computador

Figura 3.13 - Montagem do equipamento necessário ao tensionamento dos varões e para a aquisição de dados

Com o *hardware* conectado, procedeu-se à sua ligação com as células de carga, Figura 3.14 - 1. O tensionamento fez-se em quincêncio, com dois varões a serem tensionados simultaneamente, assim como os incrementos de força nos dois macacos hidráulicos, Figura 3.14 - 2. Após se atingir o patamar de força exigido em cada varão, aguardou-se até a força estabilizar, para se descarregarem os macacos hidráulicos.



1 - ligação entre o hardware de aquisição de dados e células de carga; 2 - aplicação manual da tensão nos varões

Figura 3.14 - Preparação e aplicação da tensão

3.4. Equipamento para a campanha experimental

O equipamento a utilizar nos ensaios, consiste, entre outros, num macaco plano, uma bomba manual para injeção de óleo e um manómetro que permite ler a pressão do sistema. Para os macacos planos, foram disponibilizadas macacos semi-ovais da Controls-Group, assim como a bomba manual e o manómetro. Aquando da calibração dos macacos, uma vez que estes se encontravam já bastante deformados, reparou-se que o manómetro não acusava qualquer valor, independentemente do número de incrementos de pressão que se introduziam no sistema. Para além desta falha de equipamento, possivelmente devido à válvula que interdita a entrada de ar na bomba encontrar-se avariada, ocorreu também uma fuga de óleo no macaco, inutilizando assim o equipamento.

Para repor este material, utilizou-se uma bomba, manómetro e macaco plano de diferentes marcas.

O equipamento utilizado nos ensaios compreendeu-se em:

- Bomba manual ENERPAC de duas velocidades, com pressão máxima de 700 bar, Figura 3.12 - 3;
- Manómetro com 16 centímetros de diâmetro, escalado em 0.2 bar, até uma pressão máxima de 40 bar, Figura 3.15 – 1;
- Mangueira hidráulica de alta pressão ENERPAC, Figura 3.12 – 5;
- Válvula de agulha, servindo de transição entre a mangueira e a entrada do macaco plano, válvulas de engate rápido e redução de diâmetro, Figura 3.15 – 2;
- Alongâmetro digital, com distância entre a ponteira fixa e basculante de 20 centímetros e resolução de 1 micrómetro, Figura 3.15 – 3;
- Macaco plano de alumínio semi-circular da NOVATEST, com 26 centímetros de altura, 35 de comprimento, 3 milímetros de espessura e um fator de calibração de 0.86, Figura 3.15 – 4;
- Chapa metálica, com as mesmas dimensões do macaco plano, Figura 3.15 – 5;
- Máquina de corte com 36 centímetros de diâmetro, Figura 3.15 – 6, capaz de realizar um corte com a mesma profundidade do macaco plano.



1 - manómetro; 2 - válvulas; 3 - alongâmetro; 4 - macaco plano; 5 - chapa; 6 - serra de corte

Figura 3.15 - Equipamento para o ensaio de macacos planos simples

A Figura 3.16, representa uma esquematização da montagem do conjunto necessário à realização do ensaio.

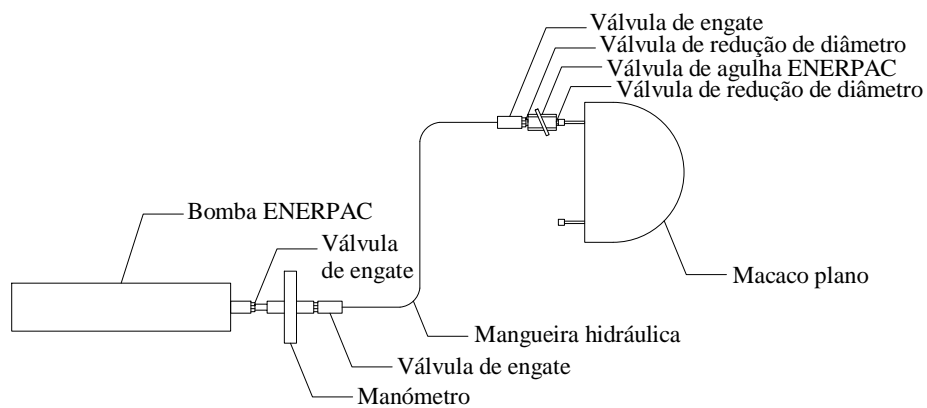


Figura 3.16 - Esquematização do equipamento para o ensaio de macacos planos simples

3.5. Campanha de ensaios de macacos planos simples

Na presente secção, é apresentado o procedimento de ensaio adotado, assim como imagens e cotagens referentes à posição do rasgo para cada ensaio. É também feito um levantamento geométrico da zona de corte.

Na Figura 3.17, é ilustrada a localização dos ensaios, no modelo experimental.

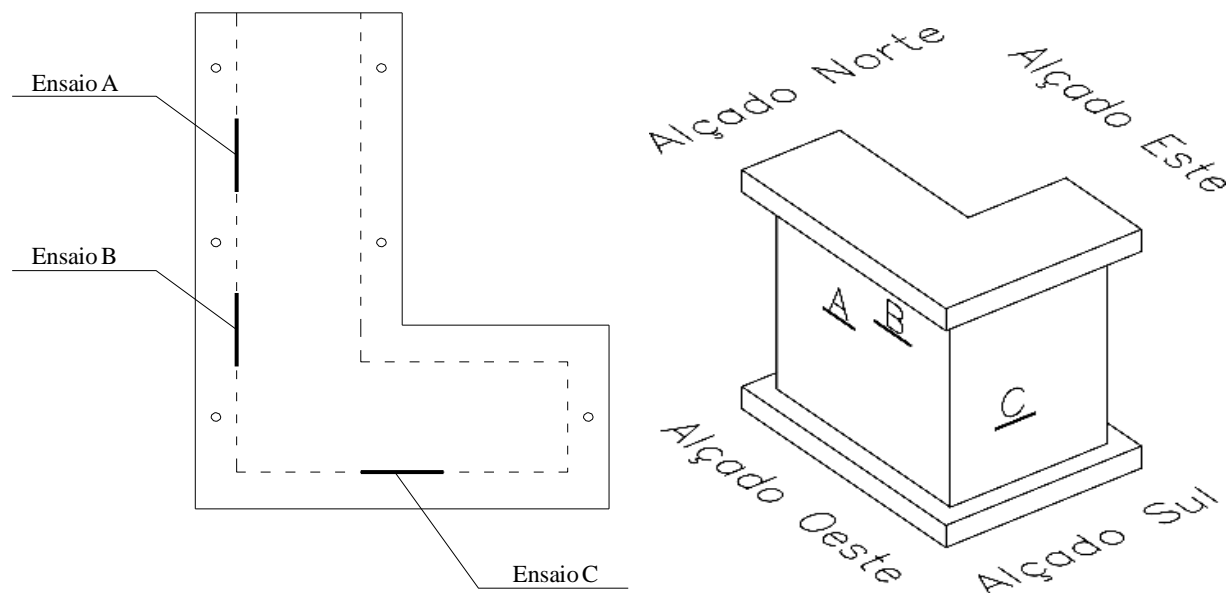


Figura 3.17 - Distribuição dos ensaios

3.5.1. Procedimento de ensaio

O procedimento adotado para os três ensaios realizados, consiste em boas práticas e adaptações retiradas das normas RILEM e ASTM, assim como bibliografia analisada.

O primeiro passo foi a escolha do local do rasgo. Em todos os ensaios, tentou-se identificar uma janela de ensaio onde fosse possível abranger o máximo de argamassa possível, contendo alvenaria acima e abaixo do rasgo, de maneira a que caibam os alinhamentos das miras, uma vez que estes não podem ser colados na argamassa, e garantindo a equidistância relativamente ao rasgo. Feita a escolha do local, procedeu-se à marcação de uma linha com o comprimento total do macaco e o mais horizontal possível, assinalando-se a posição das mangueiras do macaco, já que estas não podem coincidir com a posição dos alinhamentos, pois impossibilitam a sua medição.



1 – marcação das linhas; 2 – verificação de horizontalidade

Figura 3.18 - Marcação da linha de corte

Para a colagem das miras, esta fez-se com uma massa de colagem de secagem rápida, da marca comercial “Pattex”, bastando misturar-se o produto e aplicando-o logo de seguida no local a colar. A zona é limpa com água *a priori*, assegurando uma boa aderência entre a massa e o suporte. Dado o alcance limitado da ponteira basculante do alongâmetro, é necessário garantir uma distância, entre as miras do mesmo alinhamento, o mais próximo possível dos 20 centímetros. Para tal, é utilizada uma barra com duas ponteiras fixas, também ela com 20 centímetros, em que se marca na massa o local exato da mira, Figura 3.19 – (2). Esta é então colocada sobre a massa, Figura 3.19 – (3), de forma a que os planos das miras dos alinhamentos fiquem paralelos entre si, Figura 3.19 – (1). É necessário ter este cuidado pois, caso contrário, as ponteiras do alongâmetro não encaixam totalmente na concavidade das miras e tendo em conta a escala a ser medida, irá resultar em oscilações nos valores medidos.



(1) - precaução de colagem; (2) - marcação das miras; (3) - colagem da mira à massa

Figura 3.19 - Colagem das miras

Com as miras colocadas e a massa seca, procedeu-se à primeira medição que antecede o corte. Nesta medição e em cada incremento de pressão, são feitas três medições para cada alinhamento. Feita a medição, foi possível realizar-se o rasgo na parede, na zona assinalada, Figura 3.20. Apesar do corte ser realizado com água para evitar o sobreaquecimento da lâmina, não existe qualquer problema em molhar as miras, pois a massa após endurecer não reage com a água. É necessária cautela por parte do operador da máquina, visto que, para retirar a lâmina do rasgo, é necessário aplicar bastante força e ao ser retirada o operador pode cair, ou a lâmina tocar no seu corpo. Recomenda-se que o corte seja sempre feito com pelo menos mais uma pessoa a auxiliar.



Figura 3.20 - Realização do rasgo

Posteriormente ao corte, o rasgo foi lavado com água para limpar quaisquer impurezas presentes, seguido de uma inspeção visual e física, podendo a última ser feita com qualquer instrumento fino e comprido o suficiente que caiba no rasgo e que consiga chegar às extremidades deste, Figura 3.21 - 1. Caso se utilize uma régua, consegue-se determinar o comprimento do rasgo e apurar se coincide com o comprimento do macaco. É assim possível averiguar a qualidade do corte, garantido que o interior do rasgo está, ou não, em condições de ser ensaiado.

De seguida, verificou-se se a chapa metálica em conjunto com o papel químico, entram na totalidade dentro do rasgo, Figura 3.21 - 2, fazendo-se o mesmo para apenas o macaco e só depois se insere o conjunto, Figura 3.21 - 3. Este procedimento permite não só saber se a lâmina chegou à profundidade pretendida, mas também evitar que o equipamento fique preso no rasgo, possivelmente inutilizando o ensaio.

A colocação do macaco é sempre feita com o cuidado de nunca o puxar ou empurrar pelas mangueiras, pois este é o ponto mais frágil e é facilmente comprometido. Poderá ser necessário recorrer a um martelo de borracha para se conseguir colocar a totalidade do macaco dentro do rasgo, Figura 3.21 – 4.



1 - inspeção do interior do rasgo; 2 - colocação da chapa em conjunto com o papel químico; 3 - introdução do macaco plano; 4 - martelo de borracha

Figura 3.21 - Verificações e colocação do macaco plano dentro do rasgo

Com o aparato inserido no rasgo, montou-se todo o restante material, Figura 3.22, como esquematizado na Figura 3.16.

É necessário, antes de se proceder às medições, purgar o ar que ainda esteja presente dentro do macaco, deixando a válvula de saída aberta enquanto se injeta óleo pela de entrada. Assim que a saída começar a verter óleo, significa que não existe ar dentro do macaco e pode-se fechar a válvula, estando em condições de continuar o ensaio.



Figura 3.22 - Montagem do equipamento

Previamente a qualquer incremento de pressão, são feitas novamente três medições em cada alinhamento e registados os valores, obtendo-se o deslocamento relativo de cada alinhamento Figura 3.23 - 1. Para garantir que as medições são as mais fidedignas possíveis, entre cada incremento de pressão o alongâmetro é colocado numa barra de controlo, *invar*, Figura 3.23 - 2, com duas concavidades que medem entre si exatamente vinte centímetros, onde o monitor é reiniciado. É assim possível eliminar o erro associado a variações de dimensão do alongâmetro, garantindo que todas as medições de deslocamento que se façam, são relativas aos 200 mm do *invar*.



1 - primeira medição após o corte; 2 - colocação do alongâmetro no *invar*

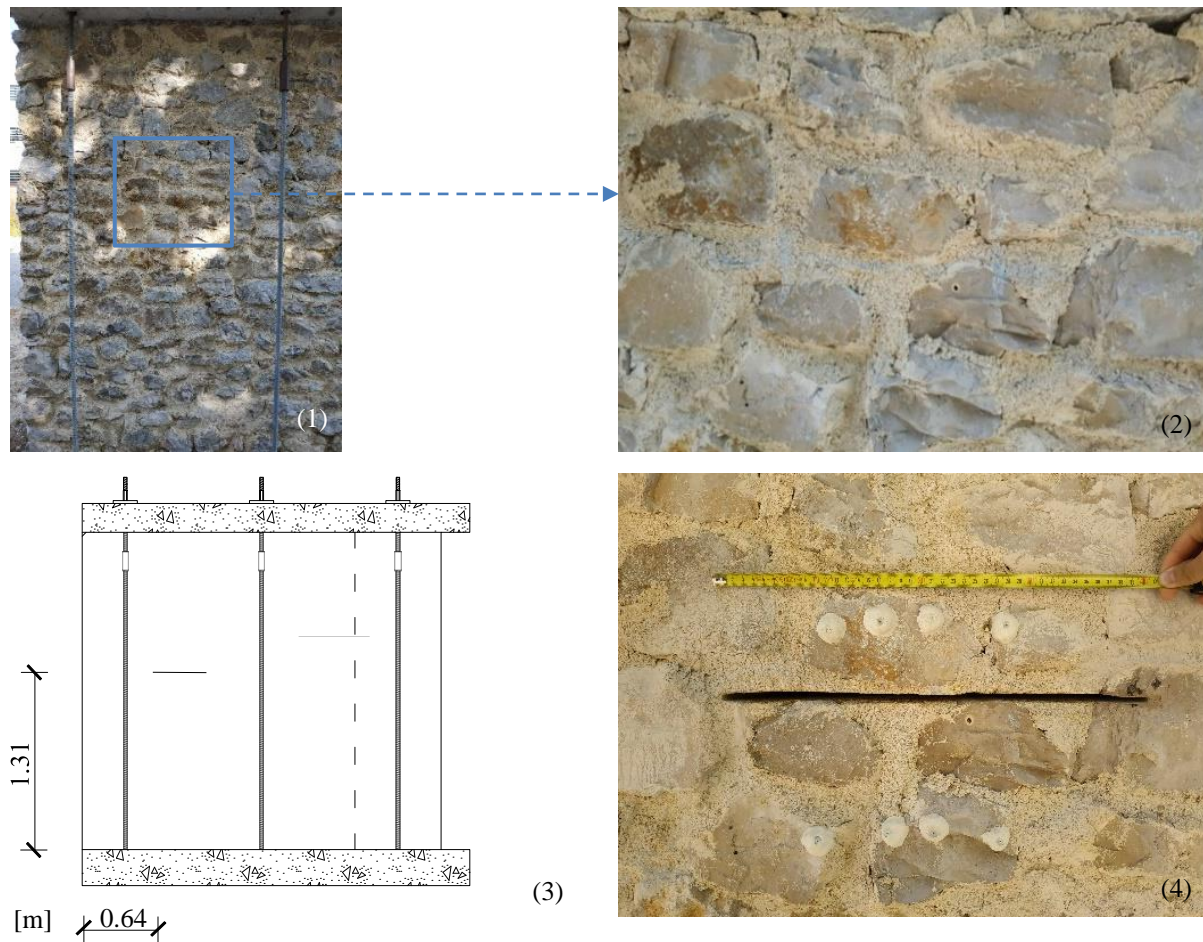
Figura 3.23 - Utilização do alongâmetro

Retirados os valores de deslocamento para a pressão zero, foram feitos incrementos de 0.20 bar no sistema, com três leituras em cada alinhamento, para cada incremento, até se atingir a distância anterior ao corte em todos os alinhamentos, cuja pressão associada é a pressão de cancelamento, P_c , Figura 2.8. Alcançada a distância inicial, prolongaram-se os incrementos de pressão, assegurando-se que a evolução dos deslocamentos mantinha a linearidade verificada até aí.

Com o ensaio concluído, é então possível fazer um levantamento da área de corte. O método adotado consiste em marcações intercaladas de 20 mm [14]. Em cada marcação é feita uma medição da profundidade do rasgo, obtendo-se no final um gráfico de barras, no qual é possível aproximar a área de corte. Quanto à área de contacto entre a alvenaria e o macaco, esta não foi possível de obter. Em dois dos três ensaios, a folha rasgou-se ao ser inserida no rasgo e no terceiro, apesar de se conseguir inserir todo o conjunto, a folha não ficou marcada, possivelmente devido ao corte ser realizado com água.

3.5.2. Ensaio A

Na Figura 3.24 - (1) e (2), apresenta-se a zona escolhida para a realização do rasgo, cuja posição e aspeto final são apresentados na Figura 3.24 - (3) e (4). A disposição da alvenaria permitiu que o corte fosse feito, quase na sua totalidade, na argamassa, facilitando também, a colocação dos alinhamentos.



(1) – janela de ensaio; (2) - pormenor; (3) - cotagem da posição do corte; (4) - vista após o corte.

Figura 3.24 - Fotografias e cotagem relativas ao ensaio A

De acordo com a secção anterior, fez-se um levantamento geométrico da zona de corte e dos alinhamentos das miras, Figura 3.25 - (1). Como exemplo, apresenta-se na Figura 3.25 - (2), o levantamento da área de corte, do qual é possível retirar uma área de 863 cm². Esta área obteve-se com

recurso ao *software* AutoCAD, bastando desenhar o levantamento efetuado e determinar o valor da área da figura geométrica desenhada.

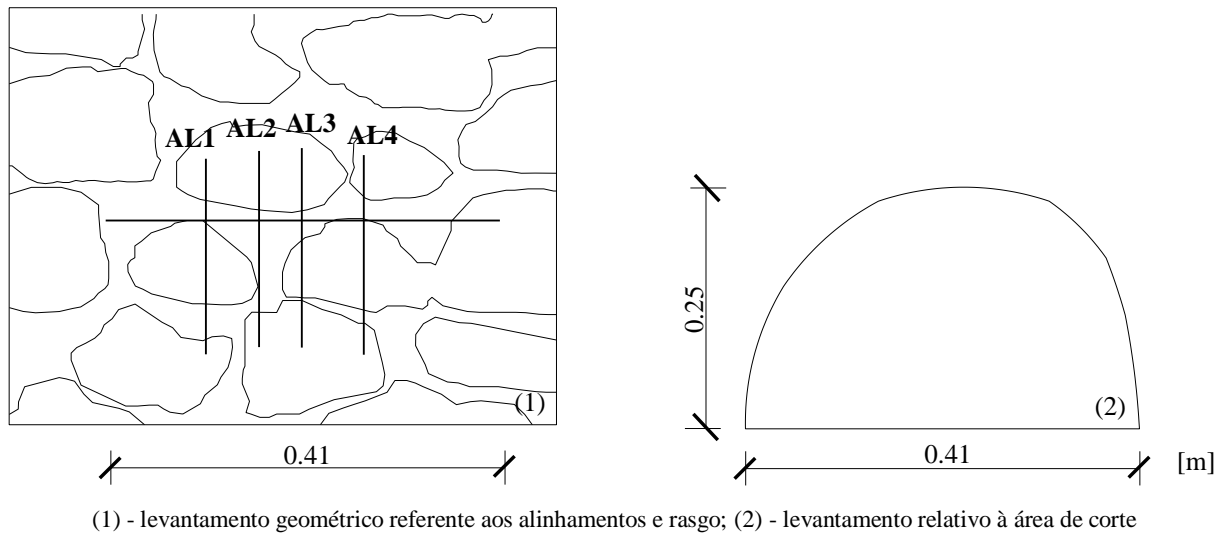


Figura 3.25 - Levantamentos geométricos do ensaio A

3.5.3. Ensaio B

Para este ensaio, a zona inicialmente escolhida seria a apresentada a vermelho na Figura 3.26 - (1), no entanto, aquando da colocação do macaco no rasgo, este ficou preso, impossibilitando a realização do ensaio. Possivelmente, a verificação da profundidade de corte não foi bem efetuada. O processo de remoção do macaco plano mostrou-se ser extremamente moroso, havendo a necessidade de remover uma pequena parte da alvenaria adjacente ao rasgo.

Colmatou-se o corte com uma argamassa monocomponente à base de cimento, *Sika Grout 213*, da marca comercial *Sika*, cuja resistência à compressão ao fim de 7 dias, é de 54 MPa. Realizou-se um segundo corte, assinalado na zona a azul, Figura 3.26 - (1), com uma parte da alvenaria a ser cortada. Após a realização deste corte, verificou-se que não era possível a colocação total do macaco dentro do rasgo, tornando-se necessário uma segunda passagem com a máquina, resultando numa área de corte substancialmente superior às restantes, 1081 cm².

Na Figura 3.26 - (2) a (4), são apresentadas imagens referentes à disposição do ensaio. O levantamento geométrico dos alinhamentos, apresenta-se na Figura 3.26 - (5).

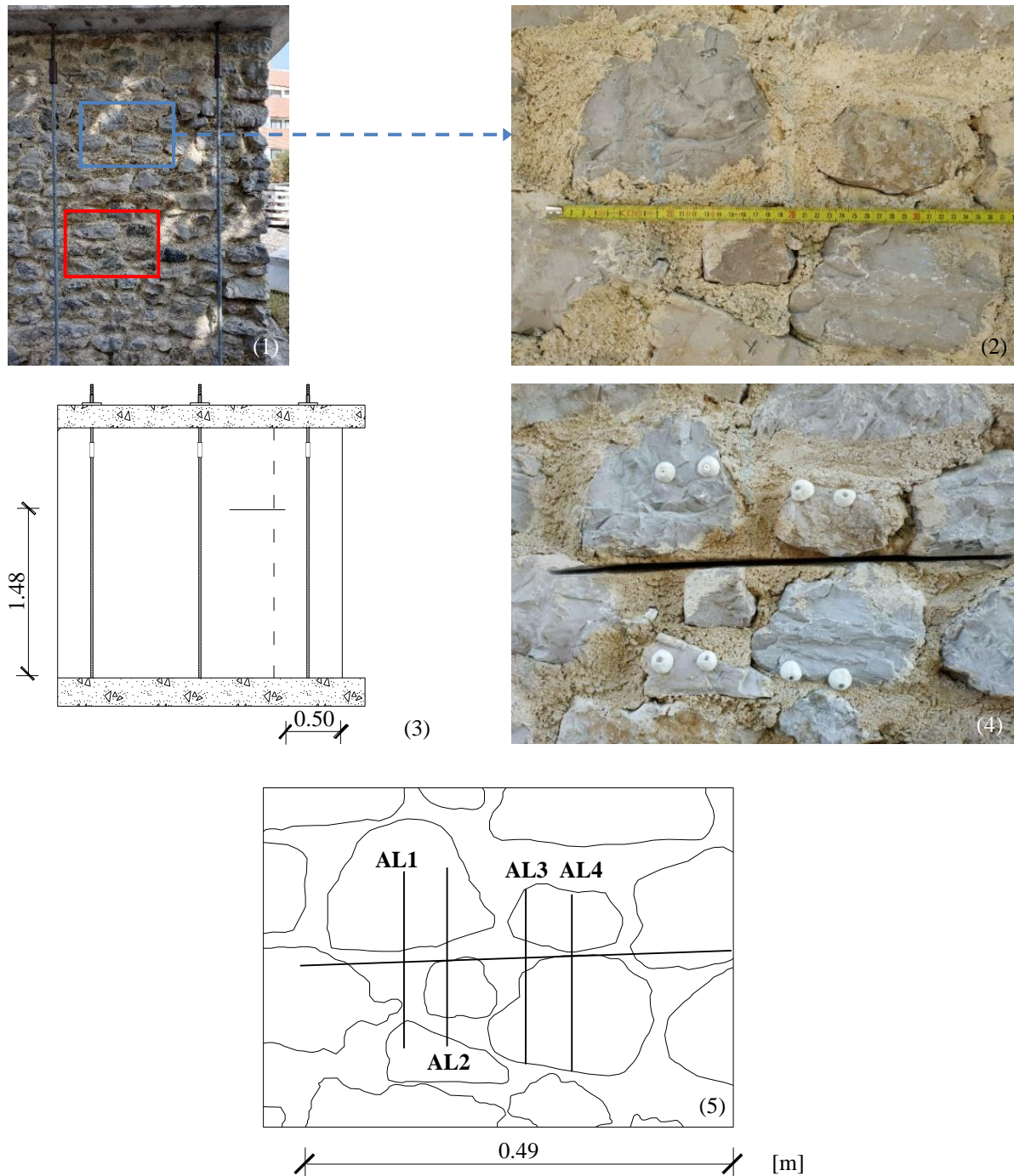
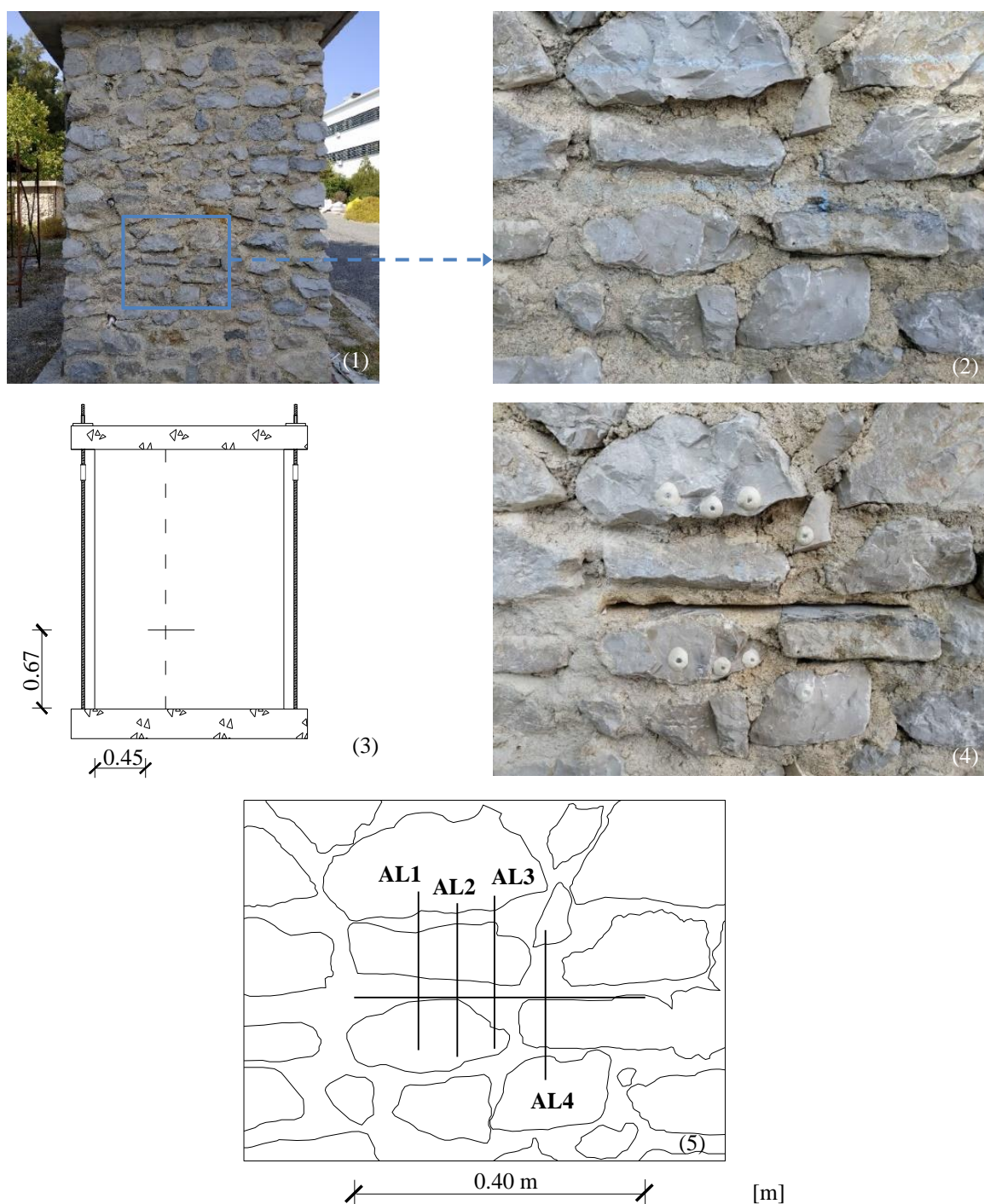


Figura 3.26 - Fotografias e cotagem relativas ao ensaio B

3.5.4. Ensaio C

Na Figura 3.27 são apresentadas as imagens respeitantes a este último ensaio, realizado na face Sul do modelo. Foi possível a realização de um corte, maioritariamente em argamassa, resultando numa área de corte com aproximadamente 841 cm². Neste e em todos ensaios, foi impossível manter uma equidistância igual, relativamente ao rasgo, para todos os alinhamentos, denotando-se a influência que uma alvenaria irregular tem, no ensaio de macacos planos.



1 – janela de ensaio; 2 - pormenor; 3 - cotagem da posição do corte; 4 - vista após o corte; 5 - levantamento geométrico

Figura 3.27 - Fotografias e cotagem relativas ao ensaio C

3.5.5. Cumprimento da normalização

As normas RILEM [14] e ASTM [13], estabelecem não só um guia para o ensaio de macacos planos, mas também requisitos que devem ser cumpridos, tanto para o equipamento utilizado, como para o procedimento de ensaio.

A norma ASTM [13], refere que o comprimento do macaco plano, A , deverá ser superior ao comprimento de uma unidade de alvenaria e nunca inferior a 20 cm. A sua profundidade deverá ser também ela superior à espessura de uma unidade de alvenaria, ou ter no mínimo 7.5 cm. Quanto à espessura, esta terá entre 1.2 a 2.4 mm, ou 1 a 2 mm, segundo a norma RILEM [14]. Com exceção deste último parâmetro, ambas as dimensões são cumpridas, devido à dimensão da alvenaria do modelo experimental ensaiado. É de ressaltar que, para o caso de outros elementos estruturais, muito dificilmente se cumpre o comprimento exigido, pois o macaco teria de possuir um comprimento substancialmente superior. Para a precisão do alongâmetro, a norma RILEM sugere $2.5 \mu\text{m}$, enquanto que a ASTM indica 0.005 % da distância entre miras, equivalente a $1 \mu\text{m}$, conseguindo-se cumprir as duas normas com o equipamento utilizado na campanha experimental.

Para a posição do rasgo e alinhamentos, ambas as normas referem que a distância entre miras deverá estar compreendida entre 0.3 e 0.6 do comprimento do macaco e que os alinhamentos de extremidade devem ser colocados a pelo menos $1/8$ desse comprimento. A norma ASTM acrescenta que a posição do rasgo deverá estar afastada de qualquer abertura ou canto, mais de 1.5 vezes do comprimento do macaco, Figura 3.28. Na Tabela 3.2, estão resumidos os valores respeitantes aos três ensaios realizados, satisfazendo-se os requisitos estabelecidos, com exceção para a distância mínima à extremidade da parede, para os ensaios B e C.

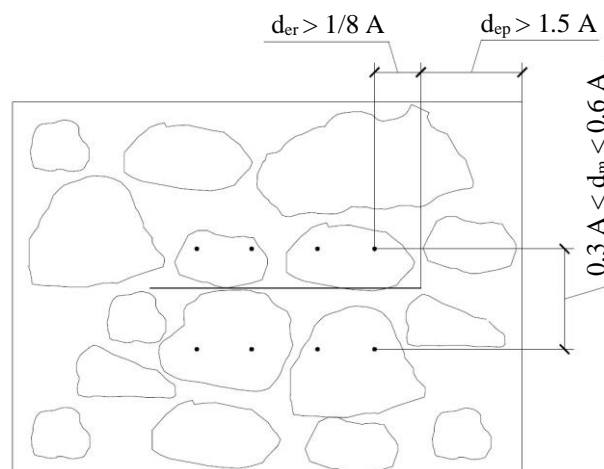


Figura 3.28 - Distâncias requeridas pelas normas ASTM e RILEM, (adaptado de [13], [14])

Tabela 3.2 - Valores requeridos e adotados para a campanha experimental, em centímetros

Requerido	Ensaio A	Ensaio B	Ensaio C
$d_{er} > 4.4$	11	12	9
$d_{ep} > 52.5$	64	50	45
$10.5 < d_m < 21$	20	20	20

3.5.6. Controlo da tensão instalada

De acordo com a secção 3.3, na Figura 3.29 apresenta-se o gráfico de força em função do tempo, para todos os varões tracionados.

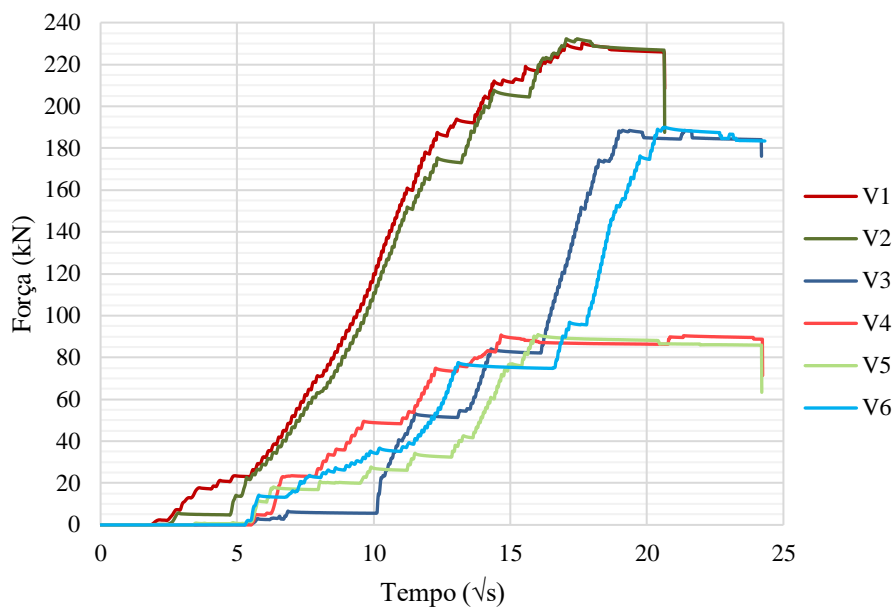


Figura 3.29 - Evolução da força aplicada, ao longo do tempo, em cada varão

Com o último valor antes da descarga, para cada varão, obtém-se uma tensão de 500 kPa no modelo experimental, para uma altura média.

No entanto, como se observa pelas Figuras 3.24, 3.26 e 3.27, os cortes foram realizados a alturas diferentes e, conseqüentemente, a contribuição do peso da alvenaria em cada rasgo é diferente, existindo assim valores distintos de tensão. Recalculou-se a tensão presente em cada rasgo, tendo em conta a sua altura. Na Tabela 3.3 apresentam-se estes valores, assim como aqueles respeitantes ao modelo criado no SAP2000.

Tabela 3.3 - Tensão atuante em cada zona de ensaio

Ensaio	Altura (m)	Tensão calculada (kPa)	SAP2000 (kPa)
A	1.31	498.24	510
B	1.48	495.18	520
C	0.67	509.76	480

Capítulo 4

Apresentação e discussão de resultados

4.1. Introdução

Neste capítulo, apresentam-se e discutem-se todos os dados referentes aos ensaios apresentados no capítulo anterior. Estes são analisados, retirando-se valores de tensão reais, obtidos através de cálculo e pelo *software* SAP2000, e experimentais, obtidos pelos ensaios experimentais. É feita uma comparação entre as duas metodologias, obtendo-se um valor diferencial, valor este que representa o grau de precisão associado aos diversos ensaios. Com estes resultados, é feita uma análise conjunta com valores de outros autores. São também apresentadas sugestões, com base em parâmetros estatísticos, relativas à análise dos resultados.

4.2. Resultados da campanha experimental

Apresentam-se na Figura 4.1, os dados relativos aos três ensaios realizados, sem a introdução dos fatores de correção. Nestes gráficos, é possível identificar no eixo vertical, os valores de deslocamento relativo e no horizontal a pressão, ambos referentes para cada alinhamento, assim como o ponto que identifica o valor da pressão de cancelamento média, P_{cm} . Este último valor é calculado pela média da pressão de cancelamento, P_c , de todos os alinhamentos, expressão (2.1). A título de exemplo, na Tabela 4.1 apresentam-se as pressões de cancelamento e respectivos valores médios para todos os ensaios.

Tabela 4.1 - Pressões de cancelamento médias

Alinhamento	$P_{c,A}$ (MPa)	$P_{cm,A}$ (MPa)	$P_{c,B}$ (MPa)	$P_{cm,B}$ (MPa)	$P_{c,C}$ (MPa)	$P_{cm,C}$ (MPa)
1	0.63	0.54	0.79	0.74	0.57	0,57
2	0.62		0.67		0.51	
3	0.66		0.73		0.63	
4	0.25		0.75		0.57	

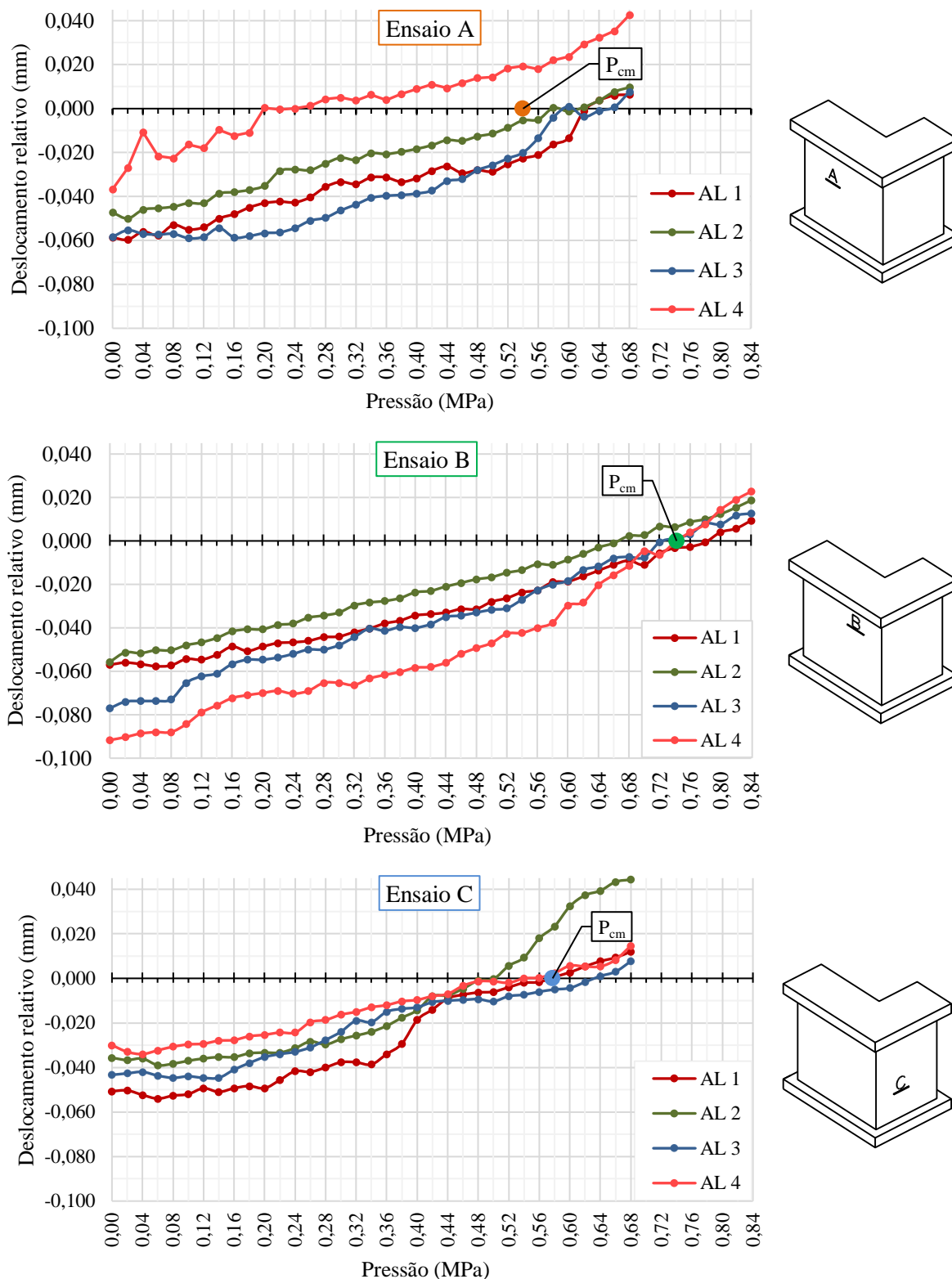


Figura 4.1 - Evolução do deslocamento relativo dos alinhamentos para os ensaios de macacos planos simples

Nos ensaios A e C, os alinhamentos 4 e 2, respetivamente, apresentam um comportamento díspar dos restantes, atingindo a pressão de cancelamento muito antes. Possivelmente, terá havido um descolamento da mira, ou esta terá sido mal colocada. Na análise da pressão de cancelamento média,

rejeitaram-se estes alinhamentos defeituosos, uma vez que se dispõe de quatro alinhamentos. A evolução da pressão média e de cancelamento, P_{cm} , dos três ensaios, sem os alinhamentos defeituosos, é exposta na Figura 4.2, com respetivos valores na Tabela 4.2.

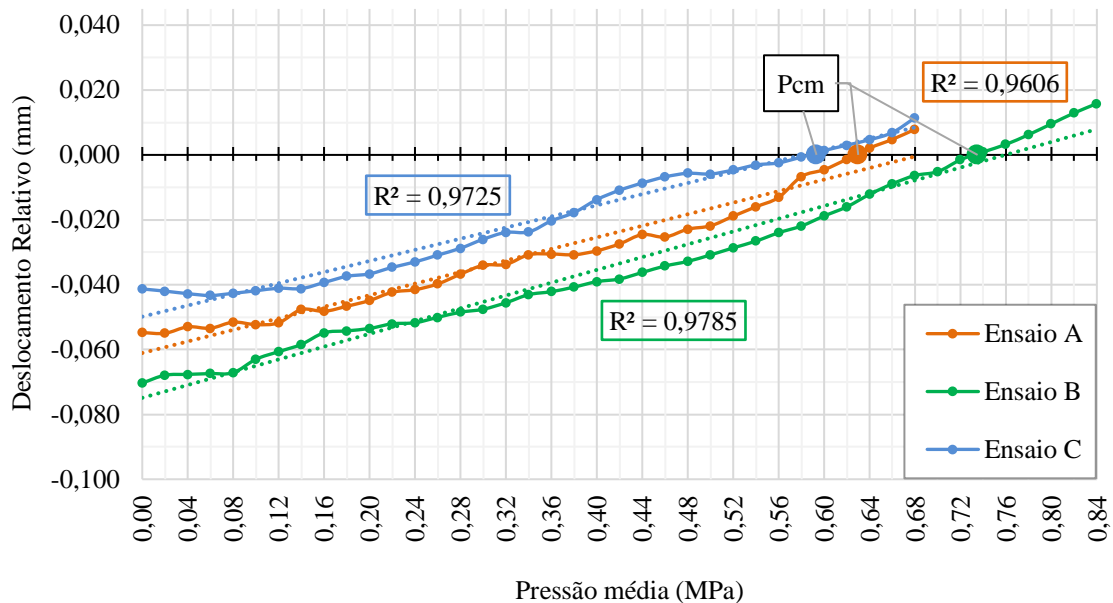


Figura 4.2 - Evolução da pressão média e respetivos valores de pressão de cancelamento

Tabela 4.2 - Pressões de cancelamento médias, sem alinhamentos defeituosos

Ensaio	P_{cm} (MPa)
A	0.63
B	0.74
C	0.59

A decisão de excluir, ou não, um alinhamento do cálculo da P_{cm} , é tomada consoante ele tenha atingido a P_c muito antes ou depois dos restantes alinhamentos, ou tenha apresentado um comportamento anómalo, sem qualquer critério quantitativo. Adotar o coeficiente de determinação, R^2 , como um indicador quantitativo, poderá ajudar a aumentar o rigor do cálculo da P_{cm} . Este coeficiente assume valores entre $0 \leq R^2 \leq 1$, em que o valor máximo implica que todos os valores se encontram sobre a reta de regressão. Ou seja, todas as medições têm a mesma evolução e, consequentemente, a evolução da pressão, de acordo com as medições efetuadas, segue um comportamento linear perfeito. Muito dificilmente se atingiria este valor máximo, já que, nesta análise, se tem em conta a fase inicial de carga correspondente à adaptação do macaco ao rasgo, e a fase final, correspondente à aproximação da pressão no macaco, à tensão instalada. As medições, são também suscetíveis a oscilações.

Criou-se um exemplo, Figura 4.3, de uma linha que pode representar a evolução de pressão num alinhamento ou de pressão média. Neste cenário, a linha apresenta um comportamento anómalo,

confirmado pelo valor de R^2 , situando-se abaixo do valor considerado razoável pela bibliografia analisada, $R^2 \leq 0.8$ [41]. Por sua vez, um valor de R^2 acima de 0.9 significa uma boa aproximação dos valores medidos à reta de regressão e acima de 0.95 uma excelente aproximação. Pode-se concluir, a partir desta análise, que existirá algum defeito nas miras colocadas, ou que as medições não foram corretamente realizadas. Na determinação da tensão instalada, este poderá ser um indicador de que o seu valor poderá não ser fiável.

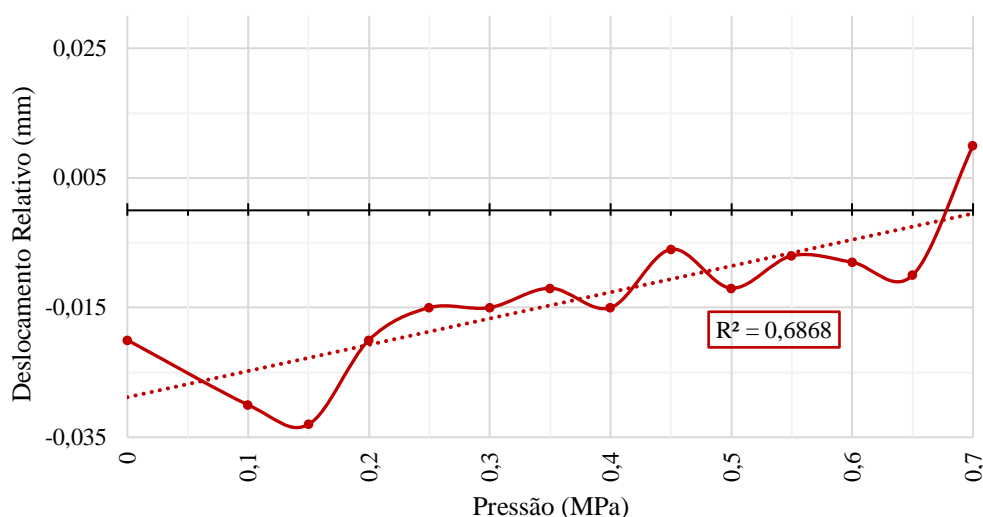


Figura 4.3 - Evolução de uma linha de pressão e respetivo coeficiente de determinação

A exclusão dos alinhamentos nos ensaios A e C, deve-se por estes terem atingido a pressão de cancelamento muito antes dos restantes, e não por um comportamento anómalo. Os valores de R^2 de todos os alinhamentos, situam-se acima do valor recomendado de 0.8.

É também possível aplicar diretamente este coeficiente à linha de pressão média, analisando a disparidade das medições efetuadas. Pelo gráfico da Figura 4.2, constata-se que os valores dos coeficientes de determinação, das linhas de pressão média, aproximam-se dos 100 %. Conclui-se que existe pouca dispersão nos valores, relativamente à reta de regressão de cada ensaio, isto é, não existe disparidade significativa nas medições realizadas em todos os ensaios. O declive das linhas de regressão é também muito semelhante em todos os ensaios, o que denota uma evolução de pressão, também idêntica.

Outro tipo de representação da evolução das pressões atuantes no macaco, é a da Figura 4.4. Neste caso, é possível observar na abcissa os três alinhamentos considerados para o ensaio A, e na ordenada os deslocamentos relativos. Com o aumento de pressão, percebe-se a transição que existe no deslocamento de cada alinhamento.

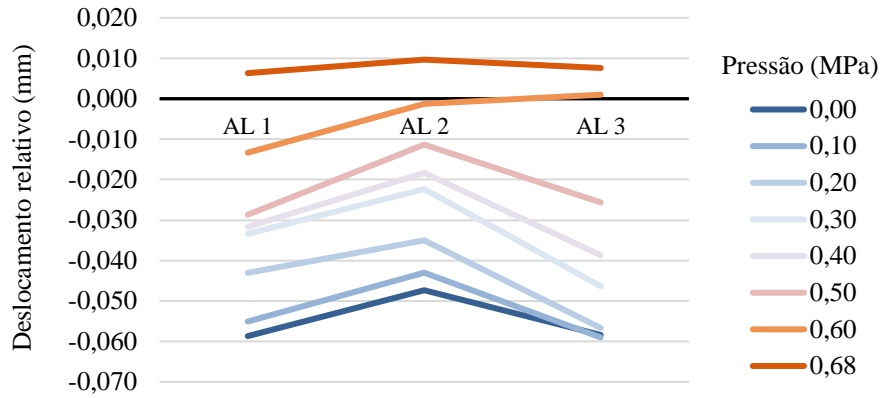


Figura 4.4 - Patamares de pressão consoante o deslocamento relativo para o ensaio A

Quanto aos valores das pressões de cancelamento médias, estes são diferentes entre si, já que ainda não foram introduzidos os coeficientes de correção, facto evidenciado pelo ensaio B e pelo que foi apresentado na secção 2.6.2. Tomando novamente o caso do ensaio A, calcula-se a tensão instalada *in-situ*, pela multiplicação da pressão de cancelamento média com respetivos coeficientes de correção, K_a e K_m . Para este primeiro coeficiente, é necessário saber a área do rasgo e de contacto. Segundo a secção 3.5.2, a área do rasgo é aproximadamente 863 cm². Quanto à área de contacto, admite-se um valor de 100 %, ou seja, existe contacto total entre o macaco e a alvenaria, cujo valor é igual à área do macaco plano, 754 cm². Pela expressão (2.6) tem-se que:

$$k_a = \frac{754}{863} = 0.87$$

Pela expressão (2.2), a tensão instalada é determinada:

$$\sigma_A = 0.87 \times 0.86 \times 0.63 = 0.473 \text{ MPa} = 473.37 \text{ kPa}$$

Encontram-se sintetizados na Tabela 4.3, os valores da tensão instalada para todos os ensaios, tendo sido os restantes valores determinados de forma análoga à expressão anteriormente apresentada. É então possível uma comparação entre os valores determinados experimentalmente, σ_E , e aqueles referentes às tensões determinadas por cálculo e *software*, σ_R . Na Tabela 4.3, é também apresentada a determinação da variação entre as duas metodologias, σ_E e σ_R , aproximada à percentagem

Tabela 4.3 - Variações obtidas pela metodologia experimental e de cálculo

Ensaio	σ_E (kPa)	σ_R (kPa)					
		Cálculo	Variação (%)	Média (%)	SAP2000	Variação (%)	Média (%)
A	473.4	498.2	-5.0	-9.4	510	-7.2	-9.7
B	435.8	495.2	-12.0		520	-16.2	
C	452.2	509.8	-11.3		480	-5.8	

Obteve-se uma variação média bastante semelhante em ambos os casos, aceitáveis para o ensaio de macacos planos simples, não ultrapassando uma variação de 20 % [13], [14]. Apesar dos valores de variação serem negativos, Gregorczyk e Lourenço [17] e a norma ASTM [13], referem que o resultado deste ensaio é ambíguo, ou seja, tanto pode sobrestimar como subestimar o estado de tensão.

4.2.1. Influência da área de contacto na variação estimada

Uma simplificação adotada para a análise de resultados, é relativa à área de contacto entre o macaco plano e a alvenaria, dada a impossibilidade da sua medição através do papel químico. Tratando-se de um trabalho de cariz experimental, é pertinente que se reduzam ao máximo os erros associados aos ensaios. Ao admitir que existe um contacto total entre o macaco e a alvenaria, contraria-se este pressuposto, mesmo que, para todos os ensaios, o interior dos rasgos não contenha quaisquer vazios e a argamassa esteja em perfeito estado, Figura 3.21 - (1).

Para perceber se assumir uma área de contacto total poderá induzir um erro elevado, adotaram-se valores de áreas de contacto, entre 70 e 100 % da área do macaco plano, determinando-se novamente a variação associada a cada percentagem de área de contacto, Figura 4.5. Consequentemente, o valor da tensão obtido pelo ensaio, será tanto mais baixo quanto menor for o valor assumido para a área de contacto, aumentando assim a variação entre o valor determinado pela expressão (2.2) e as duas metodologias de σ_R .

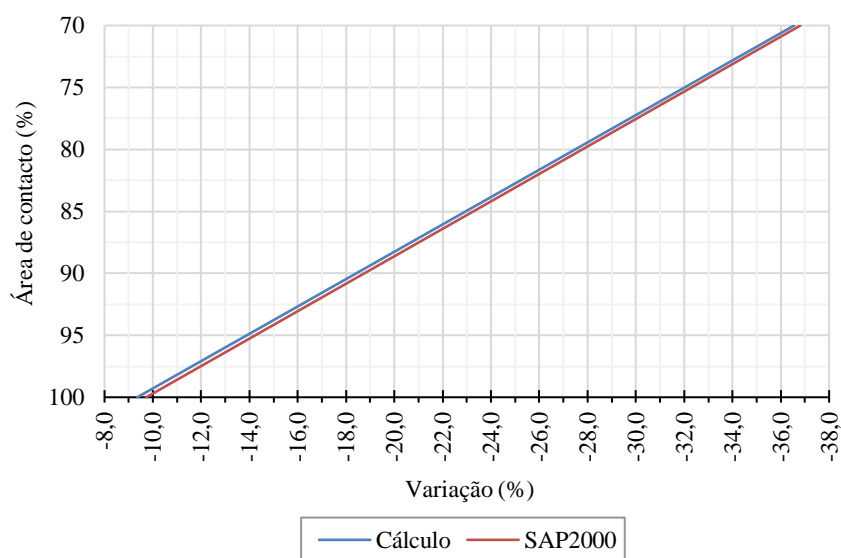


Figura 4.5 - Variação média dos três ensaios, de acordo com a área de contacto entre o macaco e a alvenaria

Para uma área de contacto de 88 %, a disparidade entre resultados ultrapassa aquela recomendada pelas normas RILEM e ASTM, de 20 %. No entanto, como já foi mencionado, o rasgo é de boa qualidade e sem quaisquer vazios no seu interior, algo que, infelizmente, não é transponível por texto. Para além disso, como demonstrado na secção 2.6.2, o facto de o macaco plano utilizado ser de alumínio mostra que é possível atingir áreas de contacto acima de 90 %. Existe, no entanto, uma pequena área do macaco

que poderá não ser solicitada, área esta que corresponde à soldadura entre as chapas que formam o macaco. Admitindo-se uma espessura de soldadura de 2.5 mm, refez-se novamente o desenho do macaco plano em AutoCAD, e determinou-se uma nova área que tem em conta este pormenor, cujo valor é de 727 cm², Figura 4.6. Tomando este novo valor de área de contacto, determinou-se novamente a variação para cada ensaio, comparando-se com os valores de σ_R , presentes na Tabela 4.4.

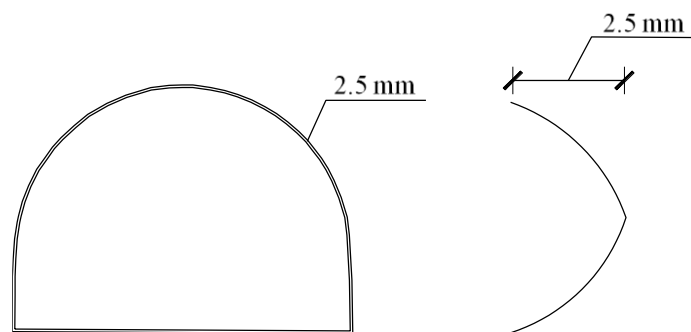


Figura 4.6 - Influência da soldadura na área de contacto do macaco

Tabela 4.4 - Variações de acordo com a influência da soldadura na área de contato

Ensaio	σ_E (kPa)	σ_R (kPa)					
		Cálculo	Variação (%)	Média (%)	SAP2000	Variação (%)	Média (%)
A	456.4	498.2	-8.4	-12.6	510	-10.5	-13.0
B	420.2	495.2	-15.2		520	-19.2	
C	436.0	509.8	-14.5		480	-9.2	

Com uma área de contato inferior à admitida para a Tabela 4.3, é expectável que haja uma maior variação nos valores calculados, facto evidenciado pela Tabela 4.4. Apesar disso, estes valores continuam ainda dentro da variação máxima sugerida pelas normas RILEM e ASTM.

4.2.2. Análise da pressão de cancelamento por interpolação e regressão linear

A pressão de cancelamento é obtida por uma interpolação com os valores de pressão, imediatamente antes e depois de ser atingido o estado inicial de deformação da parede. Ao determinar-se a pressão de cancelamento, tendo em conta apenas estes dois pontos, desprezam-se todos os incrementos anteriores e, consequentemente, a evolução da pressão ao longo do ensaio. Como as medições são obtidas por meios mecânicos e com equipamento sujeito a variações, presume-se que nem todas as medições são obtidas sob as mesmas condições, tornando-se assim oportuno determinar a pressão de cancelamento com base numa amostra superior, ou seja, tendo em conta todos os valores de pressão e não apenas dois.

A regressão linear pode ser utilizada para prever o comportamento da linha de pressão de cancelamento, a partir do conhecimento das várias medições efetuadas, ou seja, todo o histórico de pressão é tido em

conta [42]. Dado que se fizeram entre 35 e 43 medições por alinhamento, é possível realizar uma análise das pressões de cancelamento a partir das retas de regressão, apresentadas na Figura 4.2, pois esta amostra dispõe de um número elevado de observações – medições – e quanto maior for o número de observações numa amostra, mais fiável é a aproximação da reta de regressão.

Calculou-se a variação de acordo com o valor da pressão de cancelamento de cada linha de regressão linear, Tabela 4.5, e comparou-se com os valores médios obtidos pela metodologia corrente, Tabela 4.6. A variação obtida por regressão linear, mostra-se inferior em 25 % do valor de interpolação, estando mais próxima do valor real.

Tabela 4.5 - Variações obtidas de acordo com as linhas de regressão linear

Ensaio	σ_E (kPa)	σ_R (kPa)					
		Cálculo	Variação (%)	Média (%)	SAP2000	Variação (%)	Média (%)
A	492.6	498.2	-1.1	-9.4	510	-3.4	-9.8
B	434.5	495.2	-12.3		520	-16.4	
C	433.5	509.8	-15.0		480	-9.7	

Tabela 4.6 - Comparação entre a variação obtida por interpolação e regressão linear

Interpolação (%)	Regressão Linear (%)
-12.8	-9.6

Outra questão que se coloca, é relativamente ao número de medições, já que para ensaios onde se façam menos incrementos, o intervalo da interpolação é maior, induzindo um maior erro. Criou-se um exemplo meramente ilustrativo, de um possível ensaio de macacos planos simples, Figura 4.7.

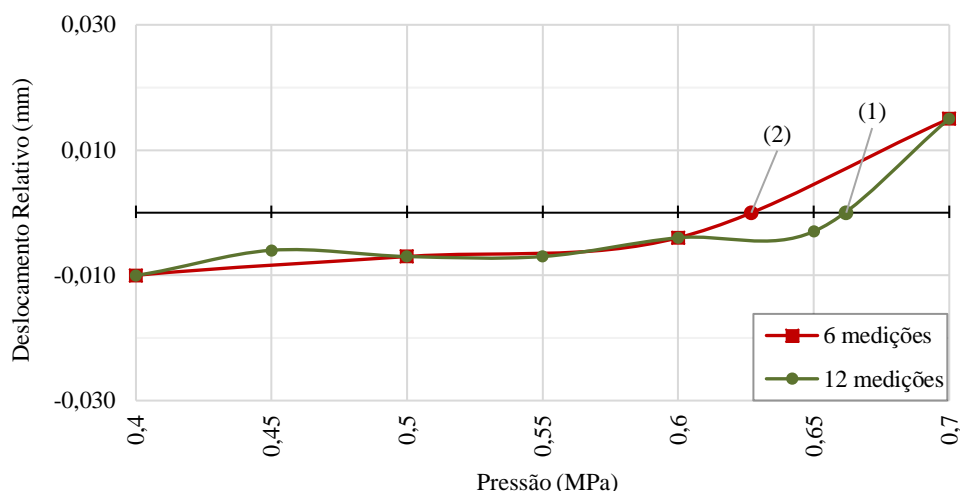


Figura 4.7 - Pressão de cancelamento para diferentes abordagens

São arbitradas seis e doze medições para a mesma linha de pressão média, evidenciando-se a diferença entre os valores de pressão de cancelamento, determinados para um intervalo menor, (1), e maior, (2), de interpolação. Num mesmo ensaio, que à partida teria uma P_{cm} de 0.63 MPa, na realidade esse valor seria de 0.66 MPa. Apesar de um erro aparentemente pequeno, poderão ocorrer situações em que a diferença entre valores é superior ao demonstrado. Percebe-se, então, que, para um maior número de medições, é possível obter um valor que melhor retrata a verdadeira pressão de cancelamento. A adoção de incrementos de pressão de 5 % do valor estimado, ao invés de 25 %, como recomendado pela norma ASTM, será sempre mais conservador, transmitindo maior segurança na determinação da tensão instalada, uma vez que o intervalo de interpolação é menor.

4.3. Comparação de resultados

Na Figura 4.8, apresenta-se um gráfico que resume todos os valores obtidos pelos autores analisados, comparando-se esses valores, com os da presente dissertação.

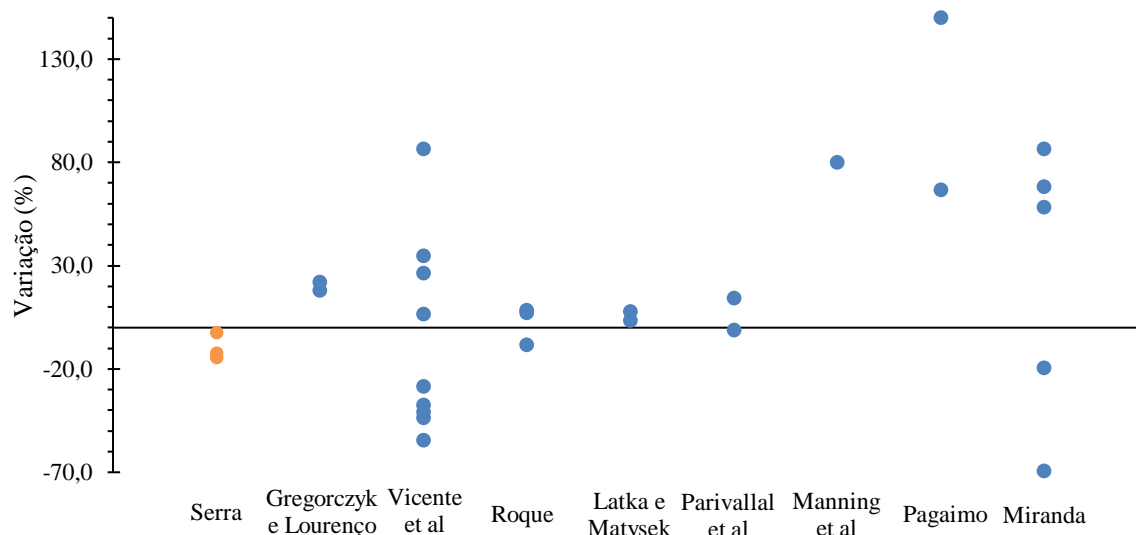


Figura 4.8 - Comparação de variações obtidas, para o ensaio simples, entre vários autores

Os valores obtidos pela presente dissertação, mostram-se muito semelhantes aos de outros autores, nomeadamente aqueles que realizaram ensaios em condições laboratoriais, como Latka e Matysek ou Gregorczyk e Lourenço, facto evidenciado pelo intervalo de confiança, desses mesmos ensaios, apresentado na Figura 4.9. Apesar da maioria dos autores, que realizaram ensaios em condições laboratoriais, se encontrar dentro do intervalo de confiança, o resultado obtido por Manning et al encontra-se fora deste.

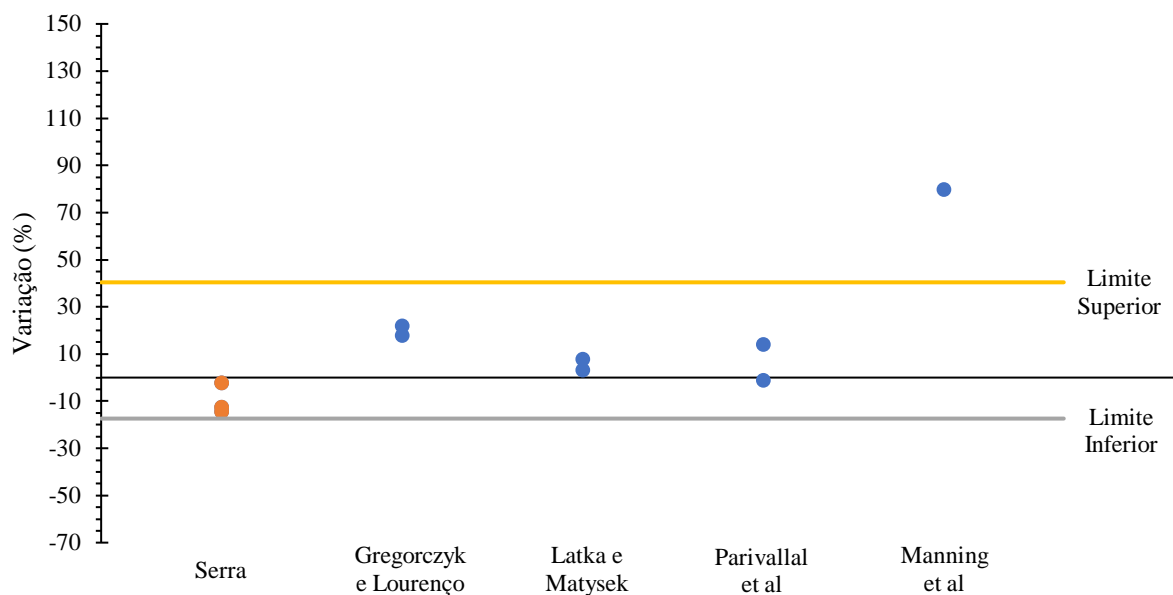


Figura 4.9 - Intervalo de confiança a 95 % para ensaios laboratoriais

Em ensaios *in-situ*, é comum observar-se uma maior variação nos resultados obtidos, algo verificado nos resultados de Vicente et al ou Miranda. Este facto é evidenciado pela Figura 4.10, onde é possível observar as médias e desvios padrões para os ensaios realizados em laboratório e *in-situ*. Dada a ambiguidade referida na secção 4.2, os dados foram tratados no seu valor absoluto.

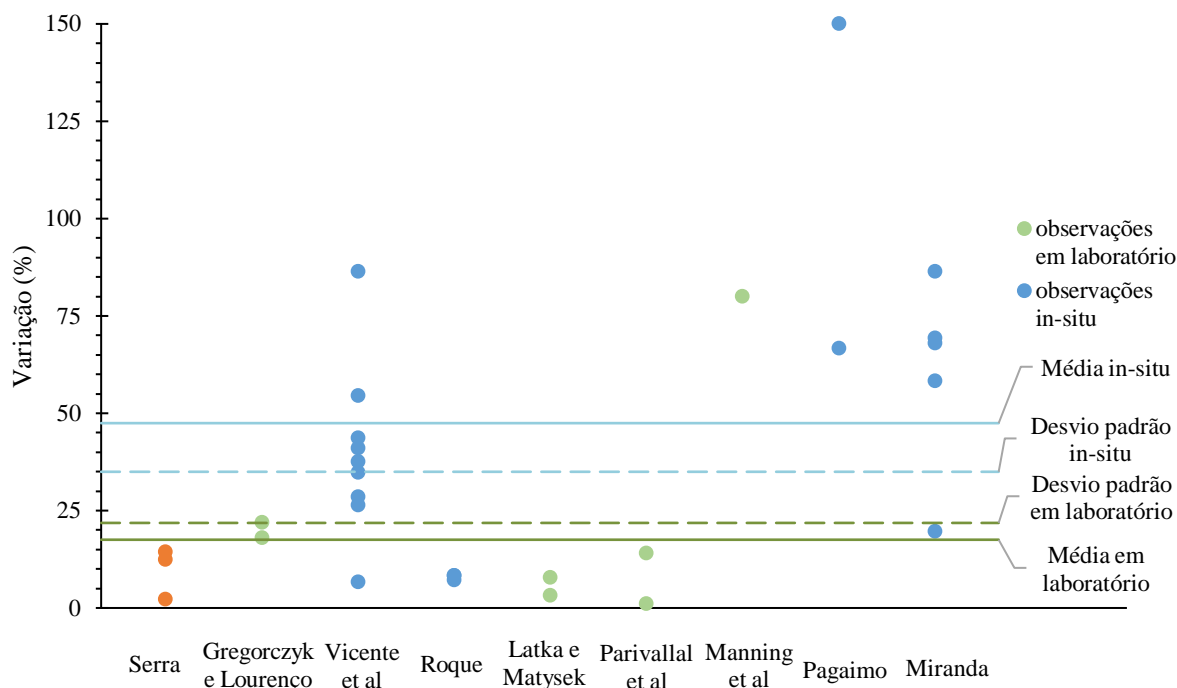


Figura 4.10 – Médias e desvios padrões para ensaios *in-situ* e laboratoriais

A média das variações para ensaios laboratoriais é de 17.5 %, enquanto que para ensaios *in-situ* este valor sobe para 47.5 %. O desvio padrão aumenta também, o que significa que os valores obtidos *in-situ*

se afastam mais do valor mediano, quando comparados com os valores obtidos em laboratório, ou seja, existe uma maior dispersão de valores. O valor do desvio padrão em ensaios laboratoriais é relativamente próximo aos de *in-situ*, devido à inclusão da observação de Manning et al na amostra, cujo valor de variação, 80 %, é substancialmente superior às restantes observações em laboratório. Caso não se tivesse em conta este autor, a diferença do desvio padrão seria ainda mais notória, assim como a média.

Esta variação, superior aos ensaios laboratoriais, prende-se pelo que foi apresentado na secção 2.6.4 por Vicente et al e também pela incerteza do cálculo da tensão instalada *in-situ*. Em paramentos de alvenaria de pedra, é comum a irregularidade na sua morfologia. Tomando o exemplo da Figura 4.11, um paramento estrutural de alvenaria de pedra irregular, com três zonas distintas, em que nas zonas assinaladas por 1 e 3 é predominante a alvenaria, quando comparado com a segunda zona, composta maioritariamente por argamassa.

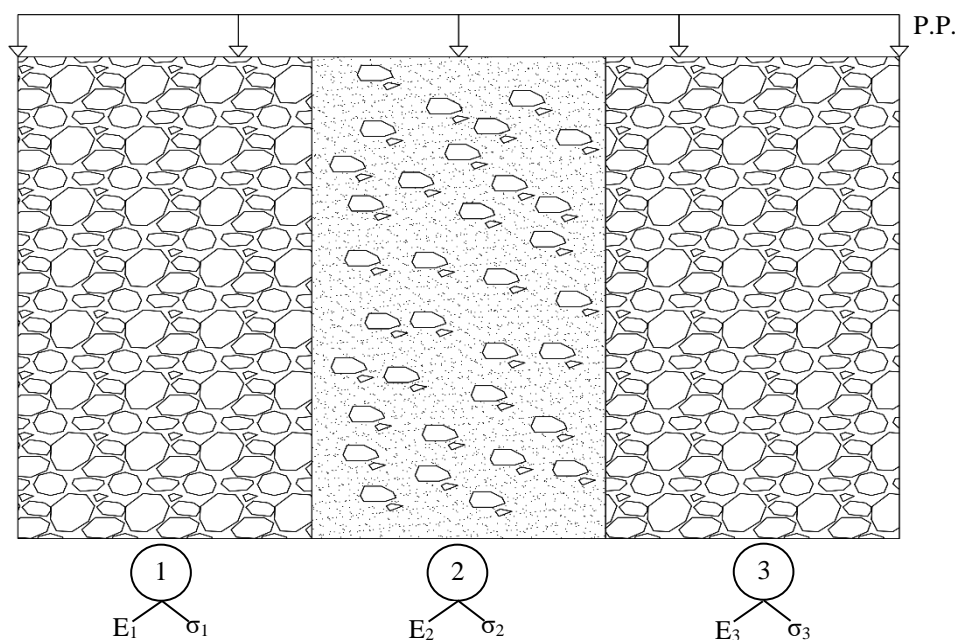


Figura 4.11 - Dispersão de tensões num elemento de alvenaria

Tendo a alvenaria um módulo de elasticidade superior à argamassa, mais rígida, é expectável que haja uma maior concentração de tensões no elemento mais rígido. Nas zonas 1 e 3, cujos módulos de elasticidade, E_1 e E_3 , respetivamente, são superiores ao módulo de elasticidade da segunda zona, E_2 , a tensão instalada nessas zonas, σ_1 e σ_3 , será superior à da zona 2, σ_2 . Numa estimativa da tensão instalada para um paramento *in-situ*, a metodologia utilizada é simplesmente determinar o peso volúmico do paramento e calcular a tensão que este aplica na cota a que se realiza o ensaio, não tendo em conta a rigidez dos elementos. Percebe-se então, a influência da rigidez na distribuição de tensões, que poderá também justificar o valor elevado das variações obtidas em ensaios *in-situ*.

4.3.1. Terceiro fator de correção

Com a realização da presente campanha experimental, pode-se retirar um padrão relativamente à tensão instalada. Todos os valores subestimam a tensão real com uma variação aproximada de 13 %. A determinação de um terceiro fator de correção que tem em conta este parâmetro, pode aproximar a tensão experimental à tensão realmente instalada. Apesar do número de observações – ensaios – ser reduzido, este poderá ser um primeiro passo na criação de uma base de dados com elementos estruturais de diferentes alvenarias e respetivas variações obtidas. Com a contribuição de resultados de diferentes autores e subsequente aumento da amostra, é possível averiguar se existe realmente um padrão que justifique a utilização deste fator.

Capítulo 5

Conclusões e propostas de trabalhos futuros

5.1. Conclusões

O ensaio de macacos planos é extremamente versátil, produzindo informação pertinente para qualquer intervenção numa estrutura. A sua aplicação em alvenaria de tijolo é bastante diferente de uma alvenaria irregular, dada a escolha do local de corte e a colocação das miras. Quando confrontado com uma alvenaria deste tipo, muito dificilmente se consegue realizar o corte totalmente na junta, deixando assim uma marca que poderá ser contraproducente quando se trata de um edificado histórico.

Os fatores de correção da pressão de cancelamento média, são essenciais à sua determinação. Na calibração de um macaco, é comum atingir pressões elevadas, as quais muito dificilmente se atingem *in-situ*. Será então mais pertinente, realizar a calibração com valores reais e não valores teóricos que apenas se atingem em laboratório. A determinação da área de contacto mostrou-se algo difícil de obter, possivelmente devido ao corte ser feito com água. A inspeção do rasgo permite perceber de uma forma qualitativa a qualidade deste, podendo ajudar o técnico a tomar uma decisão quanto ao valor da área de contacto.

A decisão de se considerar um alinhamento aceitável ou não, prende-se com o simples facto de ele atingir a pressão de cancelamento num momento diferente dos restantes alinhamentos. Caso um alinhamento tenha um comportamento considerado anómalo, poderá ser razão para ser excluído, no entanto, esta consideração é feita de forma qualitativa. O que para um técnico pode ser considerado anómalo, o mesmo pode não o ser para outro. Sendo assim, a adoção de um parâmetro estatístico que exprima este comportamento, mostra-se vantajosa. O coeficiente de determinação, R^2 , exprime a disparidade de uma série de valores, podendo-se retirar informação quantitativa relativamente à análise de um alinhamento, normalizando assim esta decisão.

A determinação da pressão de cancelamento é feita com base numa interpolação que tem em conta apenas dois valores. Entre estes dois valores assume-se que a pressão tem uma evolução linear, o que não é verídico, ou seja, quanto maior for o intervalo da interpolação, maior será o erro associado. O intervalo de interpolação é dado pelo número de incrementos de pressão, concluindo-se que quanto maior o número de incrementos, menor será o seu erro. A norma ASTM recomenda que se façam

incrementos de 25 % do valor estimado da tensão, resultando em, aproximadamente, quatro a cinco incrementos, o que nesta linha de pensamento, poderá não ser o mais pertinente. Nesta campanha experimental, foram feitos cerca de 40 incrementos de pressão por ensaio, contudo, a adoção de incrementos de 5 % do valor estimado, será sempre mais conservador comparado com o que é recomendado pela norma, transmitindo maior segurança na determinação da tensão instalada.

Tendo por base apenas dois pontos para se determinar a pressão de cancelamento, ignora-se todo o histórico de carga. Com a reta de regressão linear, é possível visualizar esse histórico e eliminar erros que se possam cometer, aquando as medições próximas da pressão de cancelamento. Com a utilização deste parâmetro, foi possível baixar a variação da campanha experimental de -12.8 % para -9.6 %.

Os valores de tensão obtidos experimentalmente, aproximam-se bastante dos valores reais, com uma variação da ordem dos 13 %. Comparando com outros autores, os resultados obtidos pela presente dissertação encontram-se bastante próximos de outros realizados sob as mesmas circunstâncias. Quando analisados os ensaios *in-situ*, a média e desvio padrão aumenta substancialmente, quando comparados com ensaios em laboratório. As variações obtidas *in-situ*, são assim superiores às obtidas em laboratório. Tal facto poderá estar relacionado com a dificuldade de determinar o verdadeiro o valor de tensão instalada, que é calculado simplesmente com o peso específico dos elementos. Tratando-se de um elemento heterogéneo, a distribuição das cargas não é feita de forma linear tendo assim influência no cálculo da tensão.

A utilização de um terceiro fator de correção, que tem em conta a variação verificada nos elementos estruturais analisados, poderá ajudar na obtenção de um valor de tensão instalada em elementos semelhantes, mais próximo da realidade. Apesar de se terem realizado apenas três ensaios, o que poderá ser insuficiente para ditar a precisão deste fator, este é um primeiro passo para a possível criação de uma base de dados com diferentes elementos de alvenaria e respetivas variações obtidas, do qual, tendo mais observações, será possível a determinação mais rigorosa de um terceiro fator de correção.

5.2. Propostas de trabalhos futuros

Nesta linha de investigação propõe-se a continuação da realização de ensaios experimentais para valores de tensão diferentes. É assim possível saber a variação do ensaio, consoante o patamar de tensão instalado.

Dado o estudo limitado de paramentos de alvenaria calcária em laboratório, sugere-se a realização do ensaio de macacos planos duplos para posterior comparação com os valores obtidos num ensaio de compressão normal. Este ensaio passará pelo seccionamento do modelo experimental ensaiado, algo que não foi possível durante esta dissertação.

A geometria e aplicação da carga nos modelos experimentais do DEC FCT NOVA, permite estudar a dispersão de cargas excêntricas em paredes de alvenaria de pedra, algo que apenas foi estudado em modelos de alvenaria de tijolo.

A irregularidade da alvenaria é motivo suficiente para perceber se a heterogeneidade do elemento tem um impacto substancial, ou não, na dispersão de tensões. Existem vários modelos experimentais cúbicos, que permitem que lhes seja aplicada um estado de tensão igual. Realizando ensaios nas quatro faces e analisando a morfologia dos paramentos, existe a possibilidade de uma maior compreensão desta dispersão.

Referências Bibliográficas

- [1] Instituto Nacional de Estatística (INE) e Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), *O Parque Habitacional e a sua Reabilitação - Análise e Evolução*. 2011.
- [2] Pinho, F. – “Aspetos construtivos e funcionais das paredes divisórias na construção tradicional,” in *Paredes2011: Paredes divisórias: Passado, presente e futuro*, Porto, Portugal, 2011, p. 1 – 14.
- [3] Decreto Lei nº 53/2014, DR 1.ª Série nº 69, de 8 de Abril de 2014, *Ministério do ambiente, ordenamento do território e energia*, p. 2337 - 2340.
- [4] ICOMOS (2003), *Principles for the Analysis, Conservation and Structural Restoration of Architectural Heritage*. ICOMOS Charter, 2003.
- [5] Appleton, J. (2011) – *Reabilitação de Edifícios Antigos - Patologias e Tecnologias de Intervenção*. Editora Orion, Lisboa, 2ª Edição.
- [6] Henriques, F. – “A conservação do património histórico edificado,” in *Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações, Laboratório Nacional de Engenharia Civil*, Memória nº775, Lisboa, Portugal, 1991.
- [7] Baião, M.; Lúcio, V.; Pinho, F.; Coelho, A. – “Aspetos da reabilitação de edifícios antigos de alvenaria,” in *Conferência Internacional sobre Reabilitação de Estruturas Antigas de Alvenaria*, p. 47 – 62, Lisboa, Portugal, 2012.
- [8] Córias, V. (2008) – *Inspecções e Ensaios na Reabilitação de Edifícios*. Editora IST PRESS, Lisboa, 2ª Edição.
- [9] Binda, L.; Saisi, A. – “State of the art of research on historic structures in Italy,” *Research Report*, Polytechnic of Milan, Department of Structural Engineering, Milão, Itália, 2001.
- [10] Pinho, F. (2008) – *Paredes de Edifícios Antigos em Portugal*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), 2ª Edição, Lisboa.
- [11] GNDT (Grupo Nazionale per la Difesa dai Terramoti), *Danno sismico e vulnerabilità delle chiese dell’Umbria*, CD-ROM, Itália, (s.d).
- [12] Rossi, P. – “Analysis of mechanical characteristics of brick masonry tested by means of in-situ tests,” in *6th International Brick and Block Masonry Conference*, p. 77 – 85, Roma, Itália, 1982.
- [13] ASTM Standard C 1196-09, *In situ compressive stress within solid unit masonry estimated using flatjack measurements*, ASTM International, 2009.

- [14] RILEM recommendation MDT.D.4, In situ stress tests based on the flat jack, 2004.
- [15] RILEM recommendation MDT.D.5, In situ stress – strain behaviour tests based on the flat jacks, 2004.
- [16] ASTM Standard C 1197-04, In situ measurement of masonry deformability properties using the flat jack method, ASTM International, 2004.
- [17] Gregorczyk, P.; Lourenço, P. – “A review on flat-jack testing,” *Engenharia Civil*, nº 9, p. 39 – 50, 2000.
- [18] Miranda, L. – “Ensaaios acústicos e de macacos planos em alvenarias resistentes,” Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, Portugal, Junho de 2011.
- [19] Mendola, L.; Guidice, E.; Minafò, G. – “Experimental calibration of flat jacks for in-situ testing of masonry,” in *International Journal of Architectural Heritage*, p. 1 – 11, 2018.
- [20] Łątka, D.; Matysek, P. – “The estimation of compressive stress level in brick masonry using the flat-jack method,” in *Procedia Engineering, International conference on Analytical Models and New Concepts in Concrete and Masonry Structures AMCM'2017*, vol. 193, p. 266 – 272, Gliwice, Polónia, 2017.
- [21] Hughes, T.; Pritchard, R. – “An investigation of the significance of flatjack flexibility in the determination of in-situ stress,” in *10th International Brick and Block Masonry Conference*, p. 569 – 578, Calgary, Canadá 1994.
- [22] Rossi, P. – “Recent Developments of the flat-jack test on masonry structures, Evaluation and Retrofit of Masonry Structures”, in *Second Joint USA-Italy Workshop on Evaluation and Retrofit of Masonry Structures*, 1987.
- [23] Łątka, D.; Tekieli, M. – “Contactless method of measuring displacement in the study of brick prisms,” in *2nd International Conference on Engineering Sciences and Technologies*, Eslováquia, p. 519 – 524, 2016.
- [24] Parivallal, S.; Kesavan, K.; Ravisankar, K.; Sundram, B.; Ahmed, F. – “Evaluation of in-situ stress in masonry structures by flat jack technique,” in *National Seminar & Exhibition on Non-Destructive Evaluation*, p. 8-13, Chennai, India, 2011.
- [25] Manning, E.; Ramos, L.; Fernandes, F. – “Tube-jack testing: Semi-irregular masonry wall testing,” in *Structural Analysis of Historical Constructions*, p. 732-739, Cidade do México, México, 2014.

- [26] Pagaimo, F. – “Caracterização morfológica e mecânica de alvenarias antigas, Caso de estudo da vila histórica de Tentúgal,” Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, Novembro de 2004.
- [27] Vicente, R.; Ferreira, T.; da Silva, J.; Varum, H. – “In Situ Flat-Jack Testing of Traditional Masonry Walls: Case study of the old city centre of Coimbra, Portugal,” in *International Journal of Architectural Heritage*, vol. 9, nº 7, p. 794 - 810, 2015.
- [28] Schuller, M. – “Nondestructive Testing and Damage Assessment of Masonry Structures,” in *In-Situ Evaluation of Historic Wood and Masonry Structures*, p. 67 – 86, Praga, República Checa, 2006.
- [29] Roque, J.; Lourenço, P. – “Caracterização Mecânica de Paredes Antigas de Alvenaria. Um Caso de Estudo no Centro Histórico de Bragança,” in *Engenharia Civil*, nº 17, p. 31 – 42, 2003.
- [30] Bartoli, G.; Betti, M.; Giordano, S. – “In situ static and dynamic investigations on the “Torre Grossa” masonry tower,” in *Engineering Structures*, vol. 52, nº 52, p. 718 – 733, 2013.
- [31] Binda, L.; Falco, M.; Poggi, C.; Zasso, A.; Roberti, G.; Corradi, R. – “Static and dynamic studies on the Torrazzo in Cremona (Italy): the highest masonry Bell Tower in Europe,” in *international symposium on bridging large spans (BLS) from antiquity to the present*, p. 10 – 100, Istanbul, Turquia, 2000.
- [32] Arêde, A.; Costa, C.; Gomes, A.; Menezes, J.; Silva, R.; Gonçalves, R.; Morais, M. – “Experimental assessment of the components and materials of stone arch railway bridges,” in *8th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management*, p. 1239 – 1246, Paraná, Brasil, 2016.
- [33] Andreini, M.; Falco, A.; Giresini, L.; Sassu, M. – “Mechanical characterization of masonry walls with chaotic texture: Procedures and results of in-situ tests,” in *International Journal of Architectural Heritage*, vol. 8, nº 3, p. 376 - 407, 2014.
- [34] Ramos, L.; Sharafi, Z. – “Tube-Jack Testing for Irregular Masonry Walls; First Studies,” in *Advanced Materials Research*, vols. 133-134, p. 229 – 234, 2010.
- [35] Manning, E.; Ramos, L.; Fernandes, F. – “Numerical Modeling of Single Tube-Jack and Flat-Jack Tests in an Unreinforced Masonry Wall with a Regular Typology,” in *Structural Analysis of Historical Constructions*, p. 315 – 322, 2019.
- [36] Pinho, F. – “Paredes de Alvenaria Ordinária – Estudo experimental com modelos e reforçados,” Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2007.

- [37] Pires, N. – “Modelação de Paredes de Edifícios Pombalinos,” Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2011.
- [38] “NP EN 1991-1-1 Eurocódigo 1: Acções em estruturas – Parte 1-1: Acções gerais,” Instituto Português da Qualidade, 2009.
- [39] Pinho, F.; Lúcio, V.; Moura, L.; Travassos, N.; Almeida, I. – “Avaliação das condições de durabilidade de ancoragens metálicas em paredes de alvenaria,” in *Conferência Internacional sobre Reabilitação de Estruturas Antigas de Alvenaria*, Lisboa, 2012.
- [40] Kunz, J.; Ruiz, M.; Muttoni, A. – “Enhanced safety with post-installed punching shear reinforcement,” in *Tailor Made Concrete Structures*, p. 679 – 684, 2008.
- [41] Miguens, M. – “Sebenta de apoio de Estatística à unidade curricular de Probabilidade e Estatística C” Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2014.
- [42] Guerreiro, G.; Mateus, A. – “Apresentação das aulas teóricas da unidade curricular de Probabilidade e Estatística C, Aula 25 – Estatística, Regressão linear”, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2014 .

ANEXO I

Neste anexo, apresenta-se a frente da folha de medições criada para a campanha experimental.



CAMPANHA EXPERIMENTAL DE MACACOS PLANOS SIMPLES

Data: / / Local:

Distância entre miras, antes do rasgo							
AL ____		AL ____		AL ____		AL ____	
Variação (mm)	Média Var. (mm)	Variação (mm)	Média Var. (mm)	Variação (mm)	Média Var. (mm)	Variação (mm)	Média Var. (mm)

Pressão (bar)	AL ____		AL ____		AL ____		AL ____	
	Variação (mm)	Média Var. (mm)	Variação (mm)	Média Var. (mm)	Variação (mm)	Média Var. (mm)	Variação (mm)	Média Var. (mm)
0								